

진화전략기반 엔진출력 최적화를 통한 선박경제운항시스템

준회원 장 호 섭*, 정회원 권 영 근*

An Economic Ship Routing System by Optimizing Outputs of Engine-Power based on an Evolutionary Strategy

Ho-Seop Jang* Associate Member, Yung-Keun Kwon* Regular Member

요 약

선박경제운항이란 기상예측정보를 활용하여 연료소모량을 최소화하도록 선박을 운항하는 것으로서 최근 많은 시스템이 이를 위해 연구되고 있다. 기존의 시스템에서는 문제의 복잡성을 줄이기 위해 엔진의 출력을 고정하거나 속력을 일정하게 운항한다는 가정을 기반으로 접근하고 있다. 그러나 엔진출력을 잘 조절한다면 더 좋은 기상환경에서 선박이 운항할 수 있게 되어 연료소모량을 더욱 줄일 수 있다. 본 논문에서는 진화전략 알고리즘을 사용하여 항로의 세부구간별로 최적출력을 탐색할 수 있는 새로운 경제운항시스템을 제안하였다. 또한, 지리적 최단 경로를 찾을 수 있는 A* 알고리즘과 곡선 표현의 자유도를 높일 수 있는 방법을 사용함으로써 임의의 출발지와 목적지에 대해서 제안된 경제운항시스템을 적용할 수 있도록 하였다. 총 36가지의 운항 시나리오에 대해서 이 논문에서 제안된 시스템의 성능을 기존의 출력고정 운항방법과 비교한 결과, 운항소요시간은 거의 차이가 없으면서도 연료소모량을 평균적으로 1.3%, 최대로는 5.6% 개선시킬 수 있음을 관찰하였다.

Key Words : Economic Ship Routing, Weather Routing, A* Algorithm, Evolutionary Strategy, Fuel Consumption

ABSTRACT

An economic ship routing means to sail a ship with a goal of minimizing the fuel consumption by utilizing weather forecast information, and many such systems have been recently developed. Most of them assume that sailing is carried out with a constraint like a fixed output of engine-power or a fixed sailing speed. However, if the output of engine-power is controlled, it is possible to reduce the fuel consumption by sailing a ship under a relatively good weather condition. In this paper, we propose a novel economic ship routing system which can search optimal outputs of the engine-power for each part of a path by employing an evolutionary strategy. In addition, we develop an A* algorithm to find the shortest path and a method to enhance the degree of curve representation. These make the proposed system applicable to an arbitrary pair of departure and destination points. We compared our proposed system with another existing system not controlling output of the engine-power over 36 scenarios in total, and observed that the former reduced the estimated fuel consumption than the latter by 1.3% on average and the maximum 5.6% with little difference of estimated time of arrival.

I. 서 론

선박경제운항이란 기상예측정보와 선박의 제원정

보 등을 활용하여 연료소모량을 최소화하도록 선박을 경제적으로 운항하는 것을 말하는데, 최근의 고유가 상황과 에너지 절약 필요성에 의해 그 중요성

※ 이 논문은 2010년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음

* 울산대학교 전기공학부 복잡계산시스템 연구실(edrizzle@mail.ulsan.ac.kr, kwonyk@ulsan.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-02-003, 접수일자 : 2011년 2월 9일, 최종논문접수일자 : 2011년 4월 4일

이 더욱 부각되고 있다. 초기에는 경제적인 운항을 위해서 적절하게 감속 운항을 하는 단순한 방법을 적용하였다. 실제로, 쌍용해운은 2004년부터 선박의 선령과 엔진의 특성을 고려한 감속운항 속력을 산출하여 운항에 적용하였는데 이를 통해 전년 대비 약 8~9%의 연료소모량이 감소하였다고 보고하였다. 하지만, 이와 같은 단순 감속 운항의 경우 연료소모량의 감소를 유도할 수는 있지만 운항시간이 늘어난다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 최근에는 기상예측 정보를 활용하여 좋은 기상조건이 예상되는 항로로 운항하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다^{[14][15]}. 예를 들면, 동적 프로그래밍 기반의 Dijkstra 알고리즘 구현을 통해 부산에서 하와이까지 가는 항로에 대해 거리는 늘어나지만 연료소모량이 감소되는 새로운 항로를 찾기도 하였으며^[11], 기상분포 바탕의 선박 실속도 분포를 Dijkstra 알고리즘에 적용하여 캘커타에서 수마트라까지의 항로에 대한 최소 운항시간 경로산출을 통해 연료소모량을 줄이기도 하였다^[4]. 이러한 연구들에서는 공통적으로 계산의 복잡성을 줄이기 위해 운항 중 선박 엔진의 출력을 일정하게 고정하거나 출력을 보정하여 선속을 일정하게 유지시킨다고 가정하였다. 그러나 항로의 부분 구간마다 엔진 출력을 고정하지 않고 선속을 어느 범위 내에서 적절하게 조절하게 되면 접촉하게 되는 기상환경을 변화시킬 수가 있다. 즉, 효과적인 엔진 출력 조절을 통해 보다 좋은 기상 조건에서 운항을 할 수 있으며 이를 통해 연료소모량을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 선박 엔진 출력의 최적화를 통한 경제운항시스템을 개발하고자 한다. 특히, 그러한 수치최적화 문제를 효과적으로 해결하기 위해서 진화전략(Evolutionary Strategy; ES) 기반의 탐색 알고리즘을 구현하였다. 선박 엔진출력이 조절될 경우, 동일한 지역도 다른 시간대에 통과할 수 있는데 본 시스템에서는 이러한 상황을 반영하여 연료소모량을 추정하도록 계산하였다. 이것은 기존의 시스템에서는 동일 지역의 통과 시간이 일정하도록 운항하는 방법만을 구현하였다는 사실을 고려할 때 연료소모량 추정 과정이 더욱 복잡해졌음을 의미한다. 제안하는 시스템의 또 하나의 장점은 A* 알고리즘의 구현을 통해 임의의 출항지와 입항지 사이의 경제운항 탐색이 가능하다는 것이다. 이에 반해 대부분의 기존 시스템은 특정 항로나 사용자가 입력한 항로를 바탕으로 탐색한다는 한계점이 있다(광범위한 성능 분석을 한 사례가 아직 없다). 이 논문에서는 총

36개의 운항 스케줄에 대해 기존의 출력 고정 운항 방법과 제안하는 시스템을 비교하였다. 광범위한 시뮬레이션을 해 본 결과 출력 고정 운항 방법에 비해 본 시스템에 의한 운항방법은 운항소요시간의 차이 없이 평균적으로 약 1.3% 연료소모량이 감소함을 관찰할 수 있었다.

논문의 전체 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선박경제운항시스템에 대한 배경지식을 설명하고, 3장에서는 이 논문에서 제안하는 시스템에 대한 내용을 다룬다. 그리고 4장에서는 시뮬레이션과 성능분석을 하고, 5장에서 결론에 대해 설명한다.

II. 배경 지식

이 장에서는 경제운항시스템을 구현하는 데 필요한 배경 지식을 설명한다. 먼저, 2.1절에서는 기존 관련시스템의 특징과 한계점에 대해서 살펴보고, 2.2절에서는 경제운항 시스템 구축에 필요한 기상예보데이터와 지리정보데이터에 대해서 설명한다. 2.3절과 2.4절에서는 지리적 최단 거리의 경로를 찾는 데 필요한 A* 알고리즘과 최적 엔진출력을 탐색하는 데 사용되는 진화전략의 개념에 대해서 각각 간단히 소개한다. 마지막으로, 2.5절에서는 이 연구에서 사용하는 연료소모량 추정식에 대해서 살펴본다.

2.1 기존의 관련 시스템

표 1은 최근의 경제운항시스템에 대한 연구 결과를 요약한 것이다. 그 중에서 SORAS^[11]는 해양지상의 일정한 격자점들을 정점으로 하고, 정점들 사이의 링크마다 연료소모 추정값을 비용(cost)으로 할당한 그래프 모델을 정의하였다. 그리고 동적 프로그래밍으로 구현된 Dijkstra 알고리즘을 통해 그 그래프에서 출발정점과 목표정점 사이의 최소비용 경로를 구하였다. 이러한 모델링에서는 링크에 할당된 비용이 고정적인데 이는 운항속도의 변화에 따른 기상조건의 차이를 고려하지 않고 있기 때문이다. 즉, 정점 A에서 B로 가는 어떤 링크에 대해서 출발점에서 정점 A까지 걸린 운항 시간에 따라 그 구간의 기상 조건이 변하게 되고 링크의 비용 역시 동적으로 변하게 되어 Dijkstra 알고리즘을 통해 구할 수 없게 된다. 사실 Dijkstra 알고리즘에 기반을 둔 이러한 접근법은 표 1에서 보듯이 SORAS 이외의 많은 다른 시스템에서 사용되어 오고 있다.

기존 경제운항시스템의 또 하나의 단점은 고정된 출력(혹은 고정된 실속력)을 바탕으로 경제운항 탐

표 1. 기존의 경제운항 관련시스템에 대한 간략 소개

기존 시스템	방법론	시뮬레이션 경로
SORAS(삼성중공업, 한국) ^[1]	Dijkstra 알고리즘과 동적프로그래밍 방법을 통해 최적 항로 추정. 저하된 선속을 보정하여 실속력을 일정하게 유지하도록 함.	부산(한국) → 하와이(미국)
RAO를 통한 최소 운항시간 탐색 시스템(IIOT, 인도) ^[2]	RAO(Response Amplitude Operator)를 통한 선속저하 연료소모와 도착시간이라는 지표를 모두 고려한 탐색을 목표로 적용함. 고정된 출력 운항.	비사카파트남(인도) → 뭍바이(인도)
다중 지표 최적화 운항시스템 (Berlin Univ. 독일) ^[3]	MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)를 바탕으로 연료소모와 도착시간이라는 지표를 모두 고려한 탐색을 하였음.	르아브르(프랑스) → 뉴욕(미국)
해양상태에 따른 효과적인 선박 진행방향 탐색 시스템(B-erhampur Univ. 인도) ^[4]	선박의 진행방향과 기상분포에 따른 감속과 선박 실속도 추정 분포를 바탕으로 최소 운항시간 경로를 탐색함. Dijkstra 알고리즘 사용. 고정된 출력 운항.	켈커타(인도) → 수마트라(인도네시아)
경로별 다양한 운항비용 분석 시스템(이탈리아) ^[5]	임의의 경로를 선정하여 경로별로 안락함, 도착시간, 안전, 연료 측면을 비교분석.	제노바(이탈리아) → 피레아스(그리스) 칼리아리(이탈리아) → 라나카(키프로스)

색이 이루어졌다는 점이다. 선박이 어떤 기상을 만나는가하는 문제는 경로뿐만 아니라, 엔진 출력 사용에도 영향을 받게 된다. 고정된 출력의 경우는 이와 같은 연료소모량 개선의 여지가 더 있음에도 불구하고 이를 찾아낼 수 없다는 한계가 있다.

마지막으로, 기존 경제운항시스템들은 특정 지역에 국한된 시뮬레이션을 수행함으로써 완전한 범용의 실용성을 보이지는 못하였다. 예를 들면, [2]에서 최소 운항시간 탐색 시스템과 [4]에서 해양상태에 따른 효과적인 선박진행방향 탐색 시스템이 개발되었지만, 인도양에서 정해진 일부의 항로에 대해서만 실험들이 이루어졌다. 또한, [5]에서도 경로별 다양한 운항비용 분석 시스템이 개발되었지만 지중해 내에서 선정된 항로에 대해서만 실험이 이루어졌다.

2.2 지리정보 및 기상예보 데이터

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(<http://www.ecmwf.int/>)의 자료들을 각각 활용하여 데이터베이스를 구축하였다. 지리정보 데이터는 총 1938개의 벡터로 이루어져 있으며, 주어진 항로에 인접한 지리정보만을 활용할 수 있도록 전 세계의 데이터를 위도 90도, 경도 90도 간격으로 8등분하여 저장하였다. 한편, 기상정보 데이터는 2009년 1월부터 12월까지 1년 동안의 세계 해양을 경위도 각각 1.5도 단위로 나눈 격자점에 대해서 6시간 단위로 이뤄진 예보 데이터이며 본 시스템에서는 많

은 기상정보들 중에서 연료소모량 추정식에서 필요로 하는 파향, 파고, 풍향, 풍속 등 네 개의 정보에 대해서만 데이터베이스를 구축하였다.

2.3 A* 알고리즘

A* 알고리즘은 출발 정점에서 목표 정점까지의 최단 경로 중 하나를 효과적으로 찾는 탐색 알고리즘이다. A* 알고리즘은 그래프에서 최소의 계산으로 최단경로를 찾는 것을 보장하며^[6], 그림 1과 같

```

A* {
// 입력 변수 : V정점들의 집합, v_s ∈ V출발 정점, v_g ∈ V목표 정점
g(v_s) ← 0;
f(v_s) ← g(v_s) + h(v_s, v_g); // h(v, w) : 정점 v에서 정점 w까지의 직선 거리
C ← ∅, D ← {v_s};
p(v_s) ← NULL;
while ( TRUE ) {
w ← minarg_{v ∈ D} f(v); // D의 정점들 중 f값이 최소인 정점
if ( w = v_g ) break;
E ← {v ∈ V \ (C ∪ D) | v는 w에 인접};
for ( 모든 정점 v ∈ E ) {
g(v) ← g(w) + h(w, v);
f(v) ← g(v) + h(v, v_g);
p(v) ← w;
}
C ← C ∪ w;
D ← (D \ {w}) ∪ E;
}
P ← NULL, v ← v_g;
while ( v ≠ NULL ) {
P ← v ⊕ P; // ⊕ : 문자열 연결(string concatenation)
v ← p(v);
}
return P; // v_s에서 v_g까지의 최단 경로
}
    
```

그림 1. 지리적 최단경로를 찾기 위한 A* 알고리즘

이 작동한다. 그 그림에서 모든 정점 v 에 대해 $f(v)$ 가 정의되는데 이는 현재까지의 탐색에 의해 계산된 출발 정점으로부터 v 까지의 거리($g(v)$)와 v 에서 목표 정점까지의 직선거리($h(v, v_g)$)를 더한 것이다. 현재의 확장 가능한 정점들(D) 중 f 값이 최소인 정점(w)을 선택하여 C 에 추가하고, 그 정점 w 를 중심으로 인접한 정점들의 f 값이 계산된다. 이 때 계산된 인접 정점들은 D 에 추가되어 다음 단계에서 확장 가능한 정점의 후보군이 된다. 이렇게 하여 A* 알고리즘은 w 가 목표 정점을 방문하는 순간 탐색이 종료된다. A* 알고리즘은 해가 존재할 경우, 출발 정점에서 목표 정점에 이르는 지리적 최단경로 하나(P)를 찾아낸다.

2.4 진화전략

본 논문에서 제안하는 경제운항시스템에서는 항로의 각 세부구간에 대한 최적엔진출력을 탐색해야 하는 데 이를 위해 진화전략 알고리즘을 활용한다. 진화전략은 자연계의 진화현상에 기반한 계산 모델로서 국소해가 많은 최적화 문제의 해를 구하는 것을 목적으로 개발된 알고리즘이다⁷⁾. 본 논문에서는 (1+1)-ES를 활용하였다. 이는 두 개의 개체로 구성되는 진화전략으로 매 세대마다 하나의 부모 개체에 표준 정규분포를 이용한 돌연변이를 적용해서 부모보다 우수한 자식 개체가 발생하면, 이것으로 부모 개체를 대체한다. 진화전략은 실수표현을 사용하므로 이 연구에서의 엔진출력 최적화문제처럼 수치최적화(numerical optimization)에 적합하다. 또한, (1+1)-ES과 같은 접근법은 품질 개선이 가능한 방향으로만 탐색을 하여 지역최적점으로서의 수렴이 상대적으로 빠르기 때문에 적당한 지역최적화 알고리즘이 존재하지 않는 수치최적화 문제에 좋은 해결책이 될 수 있다.

2.5 연료 소모량 추정식

파도와 바람은 대표적인 해양 기상정보이다. 이들 기상정보의 크기와 방향성은 선박운항에 많은 변수를 만들게 된다. 일반적으로 선박의 엔진은 출력에 따른 속도의 기대치가 있는데, 이러한 기상환경들은 기대속도와 실제속도의 차이를 만든다. 즉, 기상환경에 따라 선체에 부가저항이 생기게 되면, 부가저항은 선속저하로 이어지게 되고, 여기서 저하된 선속을 기대치까지 보정하기 위해서는 추가적인 엔진의 마력 증가가 필요하고, 이는 결과적으로 연료소모량의 증가를 불러오게 된다.

가장 대표적인 연료소모량 추정식으로는 Nakamura/Naito의 선속 저하량과 선속 보정을 위한 마력 증가량에 대한 계산 방법⁸⁾과 Townsin/Kwon의 해상 상태에 따른 선속 저하량의 계산 방법⁹⁾을 들 수 있다. 이 논문에서는 그러한 방법들을 구현한 기존의 연구 결과¹⁰⁾를 활용하였는데, 앞선 방법의 결과 값의 평균을 사용하였다. 이러한 방법을 통해 연료소모량을 추정하기 위해서는 선박의 길이, 너비, 깊이 등의 9가지 선박제원 정보(4.1절에서 설명)와 파고, 파향, 풍속, 풍향과 같은 4가지 기상정보, 그리고 선박 운항방향, 운항속도, 운항거리와 같은 3가지 운항정보가 입력 데이터로서 필요하다.

III. 제안된 선박경제운항시스템

3.1 시스템 개념

본 논문에서 제안하는 선박경제운항 시스템의 전체적인 구성은 그림 2에 보여진다. 먼저, 선박제원 정보, 출항지/입항지의 경위도, 출항시간, 입항시간 등이 입력으로 주어진다. 그러면 출항지/입항지의 경위도 정보와 2.2절에서 설명한 세계 지리정보 DB

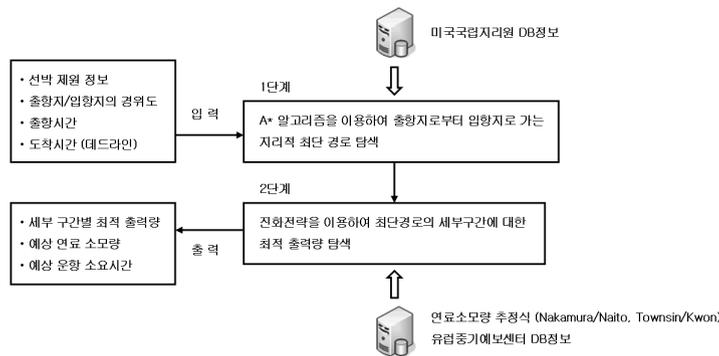


그림 2. 이 논문에서 제안하는 경제운항시스템의 개념도

를 바탕으로 A* 알고리즘을 통해 하나의 지리적 최단 경로를 찾는다. 그 경로는 3.2절에서 설명하는 격자좌표체계를 따라 여러 개의 부분 구간들로 구성되는데 진화전략 알고리즘을 적용하여 각 세부구간에서의 최적 엔진출력을 탐색한다. 이 때, 2.5절에서 설명한 연료소모량 추정식과 2.2절에서 설명한 유럽중기예보센터의 데이터가 해의 품질을 계산하는데 사용된다. 본 시스템의 최종 결과로서 각 세부구간에서의 최적 엔진출력, 추정 연료소모량, 추정 운항소요시간 등을 출력하게 된다.

3.2 정점배치체계를 이용한 A* 알고리즘 기반의 최단거리항로 탐색

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.

선박의 이동은 기본적으로 블록 단위의 이동으로 이루어진다. 또한 각각의 블록은 선박의 상세위치를 표현하기 위해 하나 이상의 정점을 가질 수 있는데 이 정점의 위치를 설정하는 작업은 경로의 자연스

런 곡선 표현 정도와 탐색 공간의 범위를 좌우하게 되므로 매우 중요하다. 일반적으로는 그림 3의 (a)와 같이 각 블록의 중심에 하나의 정점을 설정하게 된다. 그럴 경우 8개의 인접 블록 중 하나로 선박이 이동할 수 있으므로 8개의 경로가 고려가 될 수 있으며 결국 45도 단위의 각도만 표현이 가능하게 되어 자유로운 곡선을 표현하는 데 한계가 있다. 이러한 표현의 한계를 극복하기 위해 본 논문에서는 그림 3의 (b)와 같이 블록의 외곽에 8개의 정점을 배치하고, 인접 블록으로의 이동 대신 두 블록 단위의 이동을 고려하였다. 이렇게 하여 그림 3(b)의 오른쪽 그림에서처럼 40방향 중 하나로 이동할 수 있다. 이러한 다양한 각도 표현을 통해 정밀한 경로 탐색이 가능하게 된다. 그림 3(c)와 (d)는 부산에서 뭍바이까지의 최단 경로를 그림 3(a)와 (b)의 정점 배치체계를 바탕으로 A* 알고리즘을 통해 탐색한 결과를 각각 보여준다. 그 그림들에서 보여지듯이 그림 3(b)의 8개 정점 배치 체계를 사용할 경우에 훨씬 더 정확한 최단 경로를 찾을 수 있음을 알 수 있다. 이는 섬들이 많은 복잡한 지리적 환경에서 곡선 표현의 자유도를 높이는 것이 중요함을 보여준다. 한편, 본 시스템에서 사용한 A* 알고리즘은 본질적으로 임의의 출발지와 목적지가 주어지더라도 지리적 최단경로를 매우 빨리 구할 수 있다. 이러한

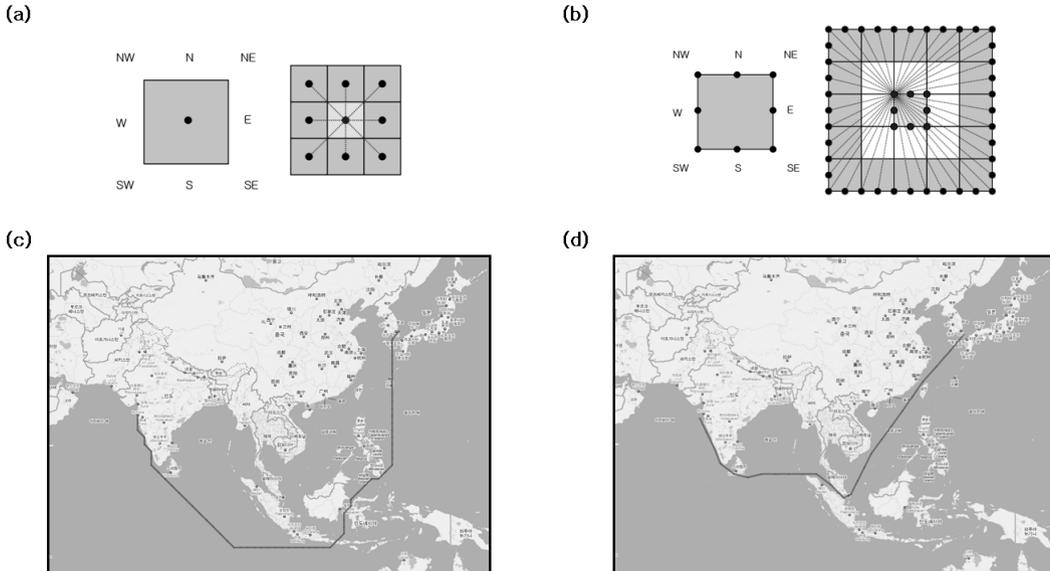


그림 3. 항로를 표현하기 위한 격자좌표체계 (a) 블록의 중심에 하나의 정점을 배치하는 방법(왼쪽그림)과 그에 따른 3×3 블록 행렬에서의 이동형태(오른쪽그림) (b) 블록의 외곽에 8개의 정점을 배치하는 방법(왼쪽그림)과 그에 따른 5×5 블록행렬에서의 이동형태(오른쪽그림) (c) (a)에서 설명한 격자체계를 이용해서 부산-뭍바이 간 최단거리를 탐색한 결과 (d) (b)에서 설명한 격자체계를 이용해서 부산-뭍바이 간 최단거리를 탐색한 결과

사실은 기존의 관련 시스템들이 동적 프로그램으로 구현한 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 경로를 탐색함으로써 한정된 항로나 사용자가 지정한 항로의 인근에서만 적용 가능하였다는 단점을 고려할 때 중요한 장점이 될 수 있다.

3.3 ES를 사용한 경로 최적 출력

3.2절에서 A* 알고리즘에 의해 구해진 지리적 최단 경로는 여러 개의 세부 구간들로 구성된다. 그림 2에서 설명한 바와 같이 이제 선박의 연료소모량을 최소화하기 위한 각 세부 구간에서의 최적 출력을 탐색한다. 이를 위해 본 논문에서는 그림 4와 같은 (1+1)-ES를 구현하였다. 논의의 편의를 위해 ES에서의 해를 $x = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ 와 같이 표기하는데 이는 경로가 n 개의 세부구간으로 나뉘었을 때, α_k 는 k 번째 세부 구간의 엔진출력을 의미한다. 이제 그림 4를 살펴보면, 먼저 모든 세부구간에서 고정된 출력 α 로 설정한 초기해를 생성한다. 그리고 부모해(x^t)로부터 Gaussian 랜덤 값만큼 변이시킨 자식해(y^t)를 생성하게 되며, 전체구간 대비 변이구간의 기대비율은 β 로 설정된다. 이러한 자식해를 따라 운항했을 때의 소요시간과 초기해(x^0)를 따라 운항했을 때의 소요시간의 차이 비율이 δ 보다 클

경우에는 다시 변이 연산을 통해 자식해를 생성한다. 이렇게 제약하는 이유는 운항소요시간의 제약이 없을 경우 감속운항과 같은 방법을 통해 연료소모량을 낮출 수 있게 되어 서로 다른 운항 방법사이의 공정한 비교가 될 수 없기 때문이다. 자식해를 생성한 후에는 x^t 와 y^t 중에서 우수한 해를 다음 세대에서의 부모해(x^{t+1})로 설정한다. 이러한 탐색을 T세대까지 반복하여 최종해(x^T)를 구하게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 파라미터 설정

표 2는 본 논문의 시뮬레이션에서 사용된 파라미터 설정을 나타낸다. 우선, 선박제원 파라미터로는 선박의 길이, 너비, 깊이 등 9가지의 파라미터가 포함되는데 이러한 정보들은 2.5절의 연료소모량 추정식에서 사용된다. 본 논문에서는 기존 논문¹⁰⁾에서 사용된 재화 중량 300,000톤급 VLOC(Very Large Crude Carrier)의 제원 정보를 활용하였고, α_{\max} 는 엔진의 최대출력 값인 25,491마력으로, α_{\min} 은 그것의 70% 수준으로 설정하였다(이 때, 최대출력에서의 기대속도는 20노트이다). 그리고 ES 파라미터의 경우, 최대 진화횟수 등 그림 4에서 필요한 값

```

Proposed_ES {
    t ← 0;
    xt ← [α α … α]; // 초기해는 모든 세부 구간에 대하여 α로 설정
    while ( t < T ) { // T : 최대 진화횟수
        for ( i = 0; i < n; i++ ) {
            if ( random[0,1] < β ) { // random[0,1] : 0과 1사이의 균등 임의의 실수값을 생성
                y(i) ← x(i) + N(0, σ); // 부모해 xt의 i번째 원소 x(i)를 평균이 0, 표준편차가 σ인
                // Gaussian 랜덤 값만큼 변이시켜 자식해 yt의 i번째 원소 y(i)를 생성
                if ( y(i) > αmax || y(i) < αmin ) i--;
            }
            else y(i) ← x(i);
        }
        if ( | (τ(yt) - τ(x0)) / τ(x0) | ≤ δ ) { // τ(x)는 x를 따라 운항 시 추정 소요시간
            if ( ζ(yt) ≤ ζ(xt) ) // ζ(x)는 x를 따라 운항 시 추정 연료소모량
                xt+1 ← yt;
            else xt+1 ← xt;
            t ← t + 1;
        } else continue;
    }
    return xT;
}
    
```

그림 4. 이 논문에서 사용된 세부구간 최적엔진출력 탐색을 위한 (1+1)-ES의 구조

표 2. 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)
	홀수 (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)
	ES 파라미터	최대 진화횟수 (그림 4에서 T)
표준편차 (그림 4에서 σ)		0.447
초기 출력 (그림 4에서 α)		0.81 * 25,491
전체구간 대비 변이구간 비율 (그림 4에서 β)		0.05
랜덤생성 최대출력 (그림 4에서 α_{max})		25,491
랜덤생성 최소출력 (그림 4에서 α_{min})		0.7 * 25,491
초기해 운항시간 대비 운항시간 오차 허용 비율 (그림 4에서 δ)		0.003

들을 표 2에서와 같이 설정하였다.

4.2 경로별 계절별 시물레이션

본 논문에서 제안한 시스템의 성능을 검증하기 위하여 다양한 경로와 계절에 대해 시물레이션을 시도하였다. 이를 위해 표 3과 같이 총 6개의 운항과 각 운항에 대해서 2009년 2월부터 12월까지 2개월 간격으로 출발날짜를 바꿔가면서 실험하였다 (총 36가지의 운항 스케줄). 그 표에서 세부구간의 개수(n)는 3.2절에서 설명한 A* 알고리즘에 의해 찾아낸 최단거리 항로에서의 세부구간들의 개수를 말한다. 시물레이션에서는 다른 운항 방법과의 성능 비교를 위해 두 가지 운항 방법을 정의하였다. 하나는 모든 세부 구간에서 동일한 출력으로 운항하는

표 3. 경로 설정

경로	출항지	입항지	세부 구간의 개수(n)
1	칼라오(페루)	시드니(호주)	44
2	시드니(호주)	칼라오(페루)	44
3	시드니(호주)	더반(남아프리카)	41
4	더반(남아프리카)	시드니(호주)	41
5	뉴욕(미국)	더반(남아프리카)	35
6	더반(남아프리카)	뉴욕(미국)	35

방법(출력고정 운항법이라고 지칭)이고 다른 하나는 그림 5에서처럼 다수의 임의의 해를 생성한 뒤, 그 중 가장 좋은 것을 택해 운항하는 방법(Random-Best 운항법이라고 지칭)이다. 출력고정 운항법에서 출력 값은 ES의 초기해와 동일하게 설정되었다. Random-Best 운항법에서 임의의 해의 생성 횟수는 ES에서 지식해의 생성 횟수와 동일하게 설정하였다. 또한 각 시물레이션에서 추정 도착시간에 대한 데드라인은 출력고정 운항법에 의한 도착시간(t)에 비해 0.3% 이내의 오차값(즉, $0.997t$ 이상 $1.003t$ 이하)으로 설정하였다.

표 4는 경로에 따른 추정 연료소모량의 6개월 평균값과 표준편차를 나타낸다(굵은 폰트는 세 가지 운항방법 중 가장 좋은 결과를 표시한다). 고정출력의 경우에는 모든 경로에서 ES와 Random-Best보다

```

Random_Best {
    x ← [α α ... α];
    z ← x;
    for ( i = 0; i < T; i++ ) {
        for ( j = 0; j < n; j++ ) {
            if ( random[0,1] < β ) {
                y(j) = x(j) + N(0, σ);
                if ( y(j) > αmax || y(j) < αmin ) j--;
            }
            else y(j) ← x(j);
        }
        if ( | (τ(y) - τ(x)) / τ(x) | ≤ δ ) {
            if ( ζ(y) ≤ ζ(z) ) z ← y;
        } else i--;
    }
    return z;
}
    
```

그림 5. Random-Best 알고리즘

표 4. 경로에 따른 6개월 평균 추정 연료소모량(괄호 안은 표준편차) (단위 : ton)

경로	고정출력	Random-Best	ES
1	1829.69 (130.75)	1809.42 (130.29)	1789.66 (117.34)
2	1504.51 (21.95)	1494.53 (21.81)	1494.17 (23.96)
3	1538.79 (80.60)	1522.55 (79.26)	1495.34 (68.61)
4	1309.68 (8.86)	1301.04 (8.68)	1302.96 (9.22)
5	1632.09 (14.87)	1621.57 (14.88)	1620.00 (15.55)
6	1715.87 (16.64)	1704.98 (16.06)	1704.61 (16.32)

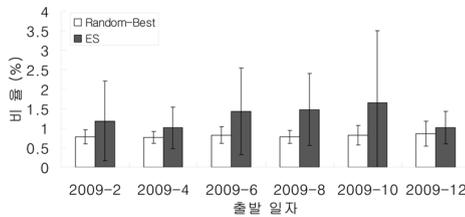


그림 6. 출발 일자에 따른 6개 경로의 추정 연료소모량 개선비율 평균(에러바는 표준편차)

성능이 좋지 못하였는데, 6개 경로의 평균을 다시 내어보면 ES의 경우 1.3%, Random-Best의 경우 0.8% 만큼 고정출력항법에 비해 개선을 이루었다. ES와 Random-Best의 비교에서는 경로 4를 제외한 모든 경로에서 ES가 Random-Best보다 연료소모량이 적었음을 알 수 있다.

그림 6은 고정 출력 대비 Random-Best와 ES의 연료소모량 개선 비율을 계절별(6개 경로 평균)로 나타낸 것이다. 계절별 결과에서 보면 Random-Best는 약 0.8%의 개선비율을 유지하는 반면 ES는 4월 1.0%, 12월 1.0%를 제외하고는 Random-Best보다 개선비율이 큰 폭을 보인다. 10월의 경우, ES는 가장 큰 1.6%의 개선 폭을 보인다. 이 결과를 통해서 ES를 통한 진화가 단순 Random-Best보다 효과가 있음을 확인할 수 있다.

4.3 출력탐색의 효과 분석

출력탐색에 따른 이점을 분석하기 위해서 ES의 결과가 가장 우수하였던 시드니(호주)에서 더반(남 아프리카) 경로를 추가로 시뮬레이션을 하였다(출발

표 5. 시뮬레이션 결과와 지역별 분석

		평 균				합 계	
		파고 (m)	풍속 (m/s)	기대 속도 (knots)	실속도 (knots)	운항 시간 (hour)	연료 소모량 (ton)
전체	고정출력	3.99	10.61	16.19	17.56	343.50	1571.43
	ES	4.00	10.64	15.70	17.21	344.51	1481.29
지역 1	고정출력	2.52	8.07	16.19	15.79	147.33	472.60
	ES	2.63	8.64	16.46	16.09	141.98	496.47
지역 2	고정출력	5.37	13.79	16.19	19.62	110.28	781.09
	ES	5.31	13.38	14.88	18.62	115.87	671.14
지역 3	고정출력	3.63	8.20	16.19	16.22	85.89	317.74
	ES	3.63	8.20	16.10	16.14	86.66	313.68

날짜를 2009년 10월로 하고, 최대 진화횟수를 5000 번으로 설정하였다).

시뮬레이션 결과 분석을 위하여 표 5와 같이 전체경로를 파고 차이가 두드러진 3개의 지역으로 나누어 보았다. 지역 1은 구간 1부터 15번까지, 지역 2는 구간 16부터 33번까지, 지역 3은 구간 34번부터 41번까지로 구분되었다. 우선, 전체 구간을 대상으로 결과를 살펴보면 출력탐색을 사용한 ES의 경우가 고정출력보다 5.7% 가량의 연료소모량 개선을 이룬 것을 알 수 있다. 지역별로 연료소모량을 살펴 보면, 파고가 가장 낮은 지역 1에서는 오히려 ES가 1.5% 만큼의 손해를 보았고, 파고가 조금 더 높은 지역 3에서는 ES가 0.2% 만큼의 근소한 개선을 이루었다. 가장 파고가 높은 지역 2에서는 7.0%로 가장 많은 연료소모량의 개선으로 다른 지역에서의 손해를 만회하는 것을 살펴볼 수 있다. 그림 7은 이와 같은 각 세부 구간별 추정 연료소모량을 비교

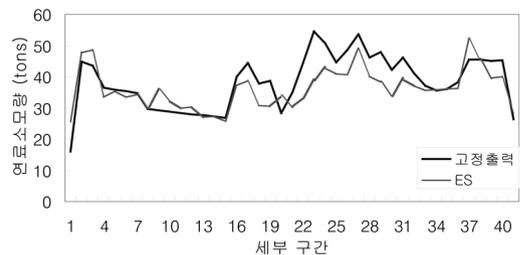


그림 7. ES와 고정출력의 구간별 연료소모량 비교

한 것으로서 지역 2(구간 16-33)에서 ES의 연료소모량 개선이 다른 지역에 비해 두드러짐을 볼 수 있다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 파고가 낮은 지역에서는 조금 손해를 보더라도 출력을 높여서 운항시간을 줄이고, 파고가 높은 지역에서는 출력을 줄여서 연료효율에서 이득을 보는 것이 결과적으로 거의 동일한 운항소요시간에도 불구하고 전체 연료소모량의 개선이 가능함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 지리적 최단 경로를 찾을 수 있는 A* 알고리즘과 곡선의 자유도를 높일 수 있는 모델링 방법을 사용함으로써 임의의 출발지와 목적지에 대해서 본 경제운항시스템을 적용할 수 있도록 하였다. 그리고 총 36가지의 운항 스케줄에 대해서 이 논문에서 제안된 시스템의 성능을 출력고정 운항방법과 비교한 결과, 운항소요시간이 차이가 없으면서도 평균적으로 연료소모량을 1.3%, 최대로는 5.6 % 개선시킬 수 있음을 관찰하였다.

기존의 선박경제운항시스템에서는 엔진의 출력을 고정하거나 속력을 일정하게 운항한다는 가정을 바탕으로 문제 해결을 시도해오고 있는데, 이로 인해 탐색하는 문제 공간이 매우 제한될 수 밖에 없다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 항로의 세부구간별로 최적출력을 탐색할 수 있는 진화전략 알고리즘 기반의 경제운항시스템을 제안하였다. 많은 시뮬레이션을 통해 제안한 시스템이 출력을 고정하는 운항 방식에 비해 운항소요시간의 지체 없이도 세부 구간별 출력 최적화를 통해 연료소모량을 더 낮출 수 있음을 알 수 있었다. 또한 구현한 진화전략의 문제 공간 탐색이 랜덤하게 탐색하는 것보다 효율적으로 이뤄졌음도 알 수 있었다. 특히, 이러한 성능 개선의 사례를 분석한 결과 파고가 낮은 지역에서 엔진출력을 높이는 반면 파고가 높은 지역에서 엔진출력을 낮추는 것과 같이 기상 조건에 따라 적절한 출력 조절이 효과가 있음을 보여준다.

이 밖에 향후 연구해 나가야할 과제를 다음과 같이 정리한다. 첫째, 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. 둘째, 항

해사들에게는 디지털화 된 시스템보다 예로부터 내려오는 항해 방법과 노하우에 대한 믿음이 커서, 이와 같은 경제운항시스템의 수용에 어려움이 있는 실정이다^[11]. 따라서 일반적인 시스템의 권고 보다는 하이브리드 형태의 상호대화형 시스템의 개발을 하여 항해 보조 시스템으로서의 가치를 높이는 것이 필요하다. 셋째, 경제운항시스템에서는 연료소모량 추정 계산과 기상 예보에 따른 성능 의존도가 높다. 특히 기상 예보의 경우, 언제나 오차가 존재할 수 있으므로, 이를 동적 보정하는 기법을 도입하여 성능의 강건함을 유지할 수 있도록 해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 최경순, 박명규, 이진호, 박건일, “실시간 기상 정보를 이용한 최적 항로 안전 평가 시스템의 연구”, *해양환경안전학회*, 제13권 제2호, pp.133-140, 2007.
- [2] C. P. Padhy, D. Sen, P. K. Bhaskaran, “Application of wave model for weather routing of ships in the north indian ocean”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.44, pp.373-385, 2008.
- [3] S. Harries, J. Heimann, J. Hinnenthal, “Pareto optimal routing of ships”, *International Conference on Ship and Shipping Research*, NAV 2003, Palermo, 2003.
- [4] J. K. Panigrahi, J. K. Tripathy, P. A. Umesh, “Optimum tracking of ship routes in 3g-WAM simulated rough weather using IRS-P4 (MSMR) analysed wind fields”, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol.36, pp.149-158, 2008.
- [5] 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.
- [6] P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael, “A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths”, *IEEE Transactions of System Science and Cybernetics*, Vol.SSC-4, No.2, 1968.
- [7] H. G. Beyer, H. P. Schwefel, “Evolution strategies”, *Natural Computing*, Vol.1, pp.3-52,

- 2002.
- [8] 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.
 - [9] R. L. Townsin, Y. J. Kwon, "Estimating the influence of weather on ship performance", *Transactions RINA*, Vol.135, pp.191-209, 1993.
 - [10] 김주영, 임병석, 노명일, 이주성, 윤범상, 권영근, "해상 상태를 고려한 선박 경제 운항 경로 결정에 관한 연구", *추계대한조선학회학술발표회*, pp.535-542, 2009.
 - [11] J. I. U. Aretxabala, S. I. Baniela, E. M. Rodriguez, "The optimum track using the classic method with the help of a personal computer", *Journal of Maritime Research*, Vol.4. No.1, pp.63-76, 2007.

장 호 섭 (Ho-Seop Jang)

준회원



2010년 2월 울산대학교 컴퓨터 공학과 학사
 2010년 3월~현재 울산대학교 전기공학부 석사과정
 <관심분야> 인공지능, 최적화 알고리즘

권 영 근 (Yung-Keun Kwon)

정회원



1999년 2월 서울대학교 전산학과 학사
 2001년 2월 서울대학교 컴퓨터 공학석사
 2006년 2월 서울대학교 컴퓨터 공학박사
 2008년 2월~현재 울산대학교 전

기공학부 교수
 <관심분야> 최적화 알고리즘, 계산생물학, 복잡계