

실해역 환경을 고려한 선박의 최적항해계획 알고리즘 연구

김동준¹⁾ · 설현주²⁾ · 김진주^{*,1)}

¹⁾ 공군사관학교 시스템공학과

²⁾ 충남대학교 군사학부

A Study on Ship Path Planning Algorithm based on Real-time Ocean Environment

Dongjun Kim¹⁾ · Hyeonju Seol²⁾ · Jinju Kim^{*,1)}

¹⁾ Department of System Engineering, Korea Air Force Academy, Korea

²⁾ Faculty of Military Studies, Chungnam National University, Korea

(Received 2 December 2015 / Revised 12 January 2016 / Accepted 25 March 2016)

ABSTRACT

Unlike terrestrial transportation, marine transportation should consider environment factors in order to optimize path planning. This is because, ship's path planning is greatly influenced by real-time ocean environment-sea currents, wave and wind. Therefore, in this study, we suggest a ship path planning algorithm based on real-time ocean environment using not only A* algorithm but also path smoothing method. Moreover, in order to improve objective function value, we also consider ship's moving distance based on ship's location and real-time ocean environment data on grid map. The efficiency of the suggested algorithm is proved by comparing with A* algorithm only. This algorithm can be used as a reasonable automatics control system algorithm for unmanned ship.

Key Words : Path Planning(경로최적화), Real-time Ocean Environment(실시간 해양환경), A* Algorithm(A* 알고리즘), Path Smoothing Method(경로평탄화)

1. 서론

선박과 같은 해양운송수단은 기차나 자동차 등과 같은 다른 육상운송수단에 비해 운행 중 실시간으로 달라지는 해양의 해류, 바람, 파도 등의 운행환경에 영향

을 많이 받는다⁴⁾. 따라서 해양운송수단의 최적항로계획을 위해서는 항해 중 영향을 주는 환경으로 인해 달라지는 선박의 움직임에 추정하여 안전하고 경제적으로 갈 수 있는 경로를 탐색해야한다^{6,13)}.

특히, 우리나라의 경우 서해안에는 인천항, 군산항 등이 위치해있고 남해안에는 부산항과 제주도가 위치해 있어 물류 및 여객 운송이 서해안과 남해안 간 빈번하게 이루어지고 있는 추세이다. 서해와 남해는 다

* Corresponding author, E-mail: jinju9896@naver.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

른 지역에 비해 해양환경의 변화가 시간에 따라 급속하게 달라지는 지역이기 때문에 선박의 이동시간대의 해양환경을 고려한 최적항로제공 알고리즘이 필요하다. 이러한 해양환경의 변화는 선박의 운영비용(연료소모율)에 영향을 미칠 뿐 아니라 인명, 화물의 손실이 발생할 수 있는 선박사고에도 큰 영향을 주고 있어^[13] 이에 대한 중요성은 더욱 증대되고 있다.

해양환경을 고려한 최적항로계획과 관련된 기존연구 역시 화물, 승객, 선체에 대한 안전을 확보하면서 동시에 연료소비나 항해시간, 즉 연료소모율을 최소화^[13,17]하기 위해 Dijkstra 알고리즘, 유전자 알고리즘, 퍼지관계급, 격자기반 A*알고리즘 등 다양한 기법을 활용하는 시도로 이루어졌다. Montes^[15]는 세부 기상정보와 위성 데이터를 반영하여 전역 최적화 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘 통해 시간 최소화를 목적으로 최적경로를 도출하였고, Padhy^[16] 역시 Dijkstra 알고리즘을 통해 실시간 달라지는 바다환경에서의 최적 경로를 도출하였다. Maki et al.^[14]은 유전자 알고리즘기법을 통해 최적항로를 찾고자 하였으며, Bui and Kim^[1]은 충돌회피시스템을 퍼지관계급 기법을 활용하여 목적지까지 안전하게 도착할 수 있는 경로를 제시하였다. Park and Kim^[17]은 선박의 RPM을 고정하여 운항하는 방식, 일정한 속도를 유지하는 방식, 구간별 최적엔진으로 속도를 변화시키는 방식을 각 시나리오별로 A*알고리즘을 통해 최적항로를 제시하였다.

본 논문에서는 선박의 최적항로 알고리즘을 제시하기 위해 기존의 다양한 연구를 바탕으로 다음과 같은 부분에서 보완하고자 하였다. 조선공학 이론을 바탕으로 함정의 이동시간 및 연료소모량을 산정하였으며 기상청, 국립해양조사원의 실시간 해류 및 기상정보를 바탕으로 격자(Grid)를 형성하고 A* 알고리즘으로 항로를 탐색하였다. 도출된 항로를 바탕으로 A* 알고리즘의 한계점을 보완하기 위해 Path Smoothing Method를 추가적으로 적용하였으며 보완된 항로상의 선박진입위치와 해당 지역의 환경정보를 기반으로 실제 선박이 이동한 거리를 반영하여 목적함수(연료소모량)를 개선할 수 있도록 하였다. 이를 통해 선박의 다양한 진입방향과 그 지역 내의 해류의 영향에 따라 달라질 수 있는 이동거리를 반영하지 못하는 기존연구의 한계점을 보완하여 보다 실질적인 항로계획이 가능하도록 하였다. 또한 전체적인 항로 설계 후 항해사가 원하는 항로를 따라 항해하기 위해 필요한 추력 방향각에 대한 정보를 제공함으로써 항로 이탈로 인한 불필

요한 연료소모나 사고 발생 가능성을 최소화하고자 하였다. 이러한 연구결과는 추후 무인선박 및 군 함정 개발 시 항해제어(Automatic Control)를 위한 알고리즘으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 최적항해알고리즘

본 연구에서는 육지, 섬 등을 고려한 지형정보, 해류, 바람 등의 해양 정보 및 항해위험지역 등의 안전정보를 활용하여 격자지도를 구성하였다. 다양한 정보를 기반으로 한 격자지도 내에서 실시간 추천항로를 제공하는 시스템을 설계하기 위해 최적경로는 아니지만 짧은 시간 내에 우수한 경로를 제공하는 A* 알고리즘^[18]을 활용하였다. 실시간 해양환경요소를 반영한 최적항로 알고리즘을 위해서는 직전 선박의 위치, 선박의 진입하는 방향에 따라 달라지는 목적함수(연료소모량)값의 반영이 중요하다. Fig. 1은 일정지역의 해류가 서동방향으로 1 knot의 속력으로 흐르고 있다고 가정한 것이다. 음영처리 된 지역으로 선박이 진입한다고 했을 때 선박이 이전에 어디에 위치하고 있었는지, 어떤 방향에서 진입하는 지에 따라 해류의 영향에 의해 이동하는 실제 거리는 달라지는 것을 확인할 수 있으며 이에 따라 목적함수인 연료소모량 역시 달라지는 것을 알 수 있다. 이러한 요소를 반영하여 도출된 최최항로는 Path smoothing method를 적용하여 A* 알고리즘의 한계점을 보완하고 현실적이고 효율적인 최종 항로를 탐색할 수 있도록 설정하였다.

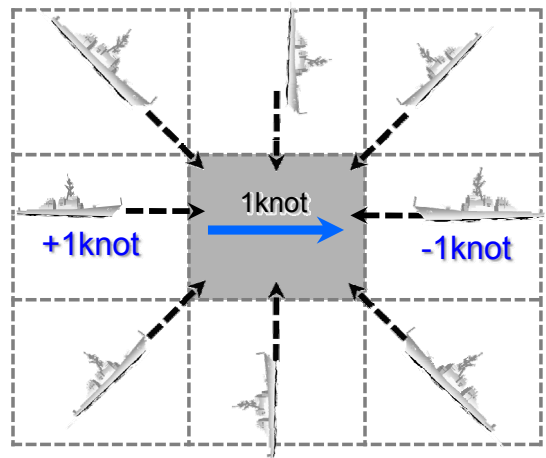


Fig. 1. Influence of current

2.1 해양환경의 모형화

앞서 언급한 것처럼 선박이 항해를 할 때 실시간으로 변화하는 바람과 파도, 해류와 같은 해양환경은 선박의 속도, 방향 등과 같은 움직임에 영향을 미친다^[17]. 따라서 선박의 최적항로를 탐색하기 위해서는 위와 같은 환경요소가 미치는 영향을 함께 고려해야 한다. 그러나 계산과정이 지나치게 복잡해질 수 있으므로 기존연구에서 제시되었던 바람의 세기를 단계화한 수치인 Beaufort Number(BN)을 기반으로 한 계산식^[12,17,19]과 조류에 의한 표류효과에 대한 계산식을 이용하도록 한다^[8,17]. Kwon and Kim^[12]은 BN을 기반으로 하여 바람과 파도에 의한 선박의 선속 손실량을 계산하였다. 본 논문에서는 기존 연구^[8,12,17]를 참고하여 선속 손실량을 계산하였다.

$$\Delta V = V \cdot \alpha \cdot \mu \left(\frac{0.7BN + BN^{6.5}}{2.7W^3} \right) \tag{1}$$

여기서 ΔV 는 선속 손실량, V 는 선박의 상용속력을 의미하며, α 는 선속과 방형계수에 따른 수정계수, μ 는 파와 바람이 들어오는 방향에 따른 상수, W 는 선박의 배수량을 나타낸다. 해류는 선박의 이동에 있어 선박의 위치에 따라 달라지는 상대속도로 반영되어 표류효과를 나타낸다. 이 경우, 선박의 속도는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다^[8,17].

$$\Delta V_x = V \cos\theta + v_x \tag{2}$$

$$\Delta V_y = V \sin\theta + v_y \tag{3}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta V_y}{\Delta V_x} \right) \tag{4}$$

2.2 격자지도(Grid map) 구성

최적항로탐색 알고리즘은 격자지도를 기반으로 수행되었다. 격자단위는 묘사정밀도 등 목적에 따라 크기 조정이 가능하며 본 논문에서는 0.2 km × 0.2 km로 구성하였다. 육지, 섬 등과 같은 지형지물이나 항행위험지역으로 선정된 곳은 격자통과시간을 무한대(Infinte)로 고려하여 알고리즘 상 항해경로에서 배제되도록 조치하였으며 기상청, 국립해양원에서 제공하는 실시간 해양 정보를 바탕으로 격자지도를 구성하였

다. 국립해양조사원이 해류벡터를 20 km 격자로 제공하기 때문에 20 km 내의 해류는 동일한 것으로 가정하여 Kronecker product 연산을 통해 단위격자지도로 구성하였다.

2.3 A* 알고리즘

해양 정보 변화에 실시간 추천경로를 제공하는 시스템을 설계하기 위해 본 논문에서는 Dijkstra 알고리즘에 비해 짧은 시간 내에 최적항로탐색이 가능한 A* 알고리즘을 사용하였다^[7,18]. Hart(1968)가 제시한 A* 알고리즘은 출발지점과 목표지점으로 정의된 한 쌍의 교점에 대해서 목표 지점의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 이용해 더욱 유망한 교점을 우선 탐색하는 깊이 우선 탐색(Depth First Search)으로 최단경로를 찾아내는 방법이다^[5]. A* 알고리즘에서 최적 경로를 찾는 평가 함수는 다음과 같다.

$$f(i) = g(i) + h(i) \tag{5}$$

여기서 $g(i)$ 는 출발지점에서 임의의 점 i 에 이르는 최소비용을 나타내고, $h(i)$ 는 임의의 점 i 로부터 목표지점에 이르는 최소비용을 추정된 비용이다. $f(i)$ 는 출발지점에서 임의의 점 i 를 거쳐 목표지점에 이르는 총 경로의 최소비용을 추정된 값이다.

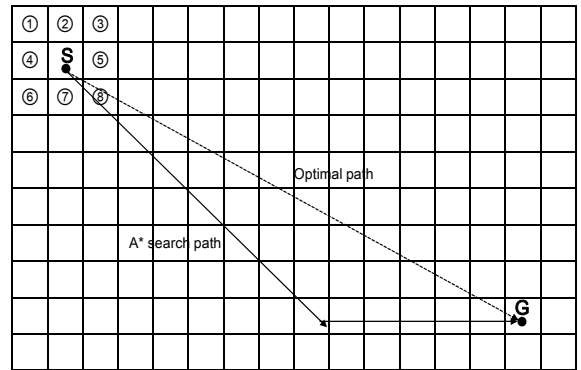


Fig. 2. Problem of A* algorithm in route planning^[3]

A* 알고리즘은 간단하고 빠르게 최적경로를 도출할 수 있다는 장점^[18]을 갖지만 출발점부터 목표점 사이에 일정크기의 격자를 생성, 탐색하여 경로를 제시하는 방법이기 때문에 격자의 크기에 영향을 받을 수 있으며 Fig. 2와 같이 현재 노드에서 인접한 8방향의

노드를 고려하여 탐색하기 때문에 최적항로를 탐색하지 못할 수 있다는 문제가 발생 할 수 있다^[3]. 이는 전자해도가 픽셀로 이루어져 있고 후보 생성 시 인접한 8방향에 대해서만 후보로 인정하기 때문에 발생하는 문제이다^[9]. A* 알고리즘의 의사코드는 다음 Fig. 3과 같다.

```

OPEN 목록 : 아직 탐색하지 않은 지점들
CLOSED 목록 : 이미 탐색한 지점들

Step 1 : 출발지점(S)과 목표지점(G)을 결정

Step 2 : CLOSED목록 생성, 출발지점(S)을 OPEN 목록에 넣고 목적함수(f)를 계산

출발지점(S)을 OPEN 목록에서 삭제,
Step 3 : CLOSED 목록에 넣고 출발지점(S)의 이웃 셀을 OPEN 목록에 위치

OPEN 목록에 있는 셀 중에서 탐색되지 않은 셀들에 대한 목적함수(f)를 계산, 탐색이 완료된 셀은 목적함수(f)를 갱신

OPEN 목록의 셀 중 가장 낮은 목적함수(f)를 갖는 셀을 선정해 OPEN목록에 삭제한 후 CLOSED 목록에 위치

선정된 셀이 도착지점(G)이면 종료, 그렇지 않으면 이웃 셀 중 CLOSED 목록에 있는 셀은 무시하고, 탐색되지 않은 셀을 OPEN 목록에 위치

Step 6 :

Step 7 : Step4로 돌아감
    
```

Fig. 3. A* algorithm pseudo code

2.4 A* with path smoothing method

위에서 언급한 것처럼 A* 알고리즘은 격자형 지도를 기반으로 방향이나 경로를 설정하기 때문에 이동 방향이나 각도에 제한이 있어 비효율적인 경로를 추천할 수도 있다는 한계가 존재한다^[3]. 이러한 A* 알고리즘의 한계점을 보완하기 위해 Kim, K. T. and Jeon, G. W.^[10]은 A* 알고리즘으로 생성된 경로에 Path smoothing method을 추가로 적용하였고 A* 알고리즘

만으로 경로를 탐색했을 때보다 효율적인 경로를 탐색한다는 것을 확인하였다. Botea et al.^[2]에 의해 제안된 Path smoothing method는 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 A* 알고리즘으로 추천된 경로로 계획된 격자의 집합에서 각 격자마다 주변의 다른 격자와의 가능한 모든 직선을 추출하여 목적함수 값을 비교하고 연결된 격자 간의 목적함수가 A* 알고리즘에서 제시한 경로의 목적함수보다 커지는 경우, 격자단위는 무시한 직선으로 연결하는 방법이다.

실제로 Fig. 5는 같은 최적항로탐색문제를 A* 알고리즘만을 적용하였을 때와 A*알고리즘에 Path smoothing method을 함께 적용했을 때 도출된 시뮬레이션 한 결과를 비교한 것으로 Path smoothing method를 함께 적용했을 때 최적경로가 부드러워지고 항해시간도 71.8시간에서 66시간으로 5.8시간이 단축됨을 확인할 수 있었다.

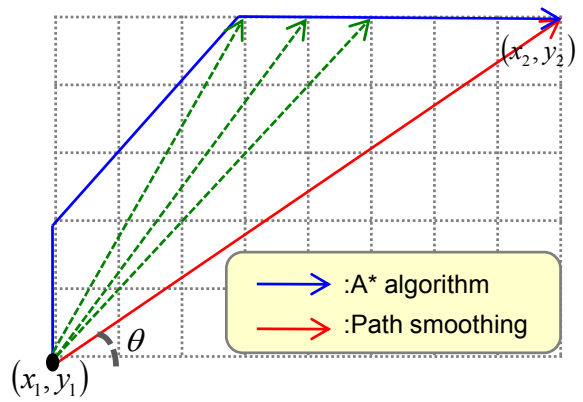


Fig. 4. Path smoothing method procedure

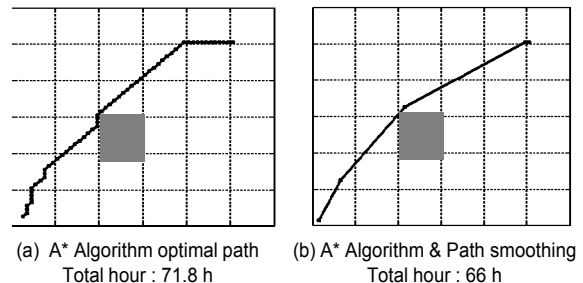


Fig. 5. Comparison of A* and A* with PS

2.4.1 A* with path smoothing pseudo code

Path smoothing method의 의사코드는 Fig. 6과 같다.

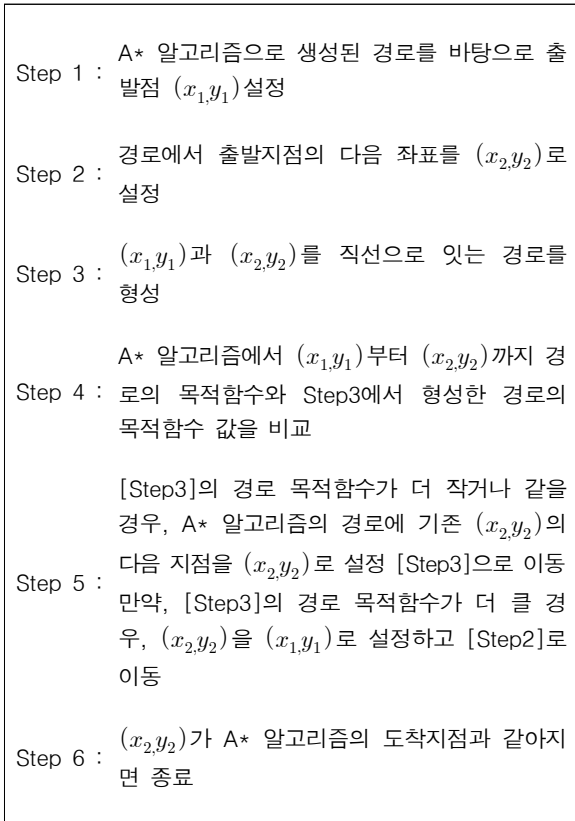


Fig. 6. A* with path smoothing pseudo code

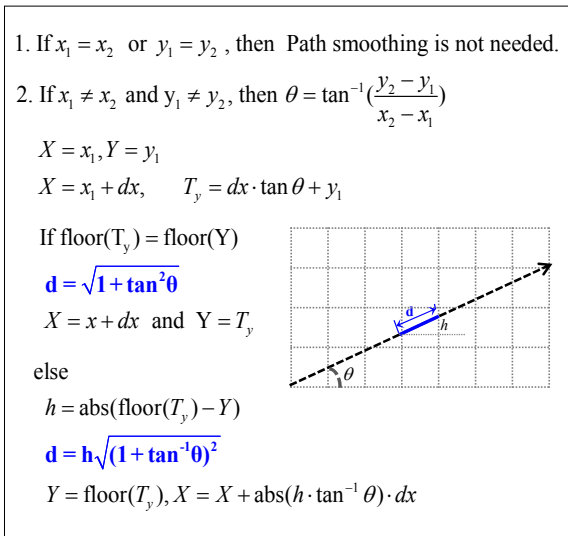


Fig. 7. Estimation method of grid distance

2.4.2 항로상 격자별 거리산정방법

Path smoothing method 적용 시 실시간으로 달라질 수 있는 해당격자의 해류정보를 기반으로 보완된 항로 상에서 실제 선박이 이동한 거리를 산정하고 이를 바탕으로 목적함수(연료소모량)가 달라질 수 있도록 다음과 같이 보완하였다. 실제 선박이 격자지도 내에서 이동한 거리(d)에 대한 산정방법은 Fig. 7과 같다.

3. 실험 및 결과분석

실시간으로 제공되는 해양 정보를 바탕으로 활동공간을 격자지도로 구성하고 A* with path smoothing 알고리즘을 이용하여 최적항로를 도출하여 A* 알고리즘만 사용한 경우와 비교하는 실험을 통해 그 효과성을 입증하고자 하였다. 실험은 시간대별 해류의 변화가 많이 나타나는 서해와 남해를 중점으로, 인천항과 제주도 서귀포항으로 이동하는 경우와 반대로 제주도 서귀포항에서 인천항으로 이동하는 경우, 같은 항로를 다른 시간대에 이동하는 경우로 예제를 구성하였다.

실험은 MATLAB을 이용하여 이루어졌으며, Intel(R) Core(TM) Duo CPU(3.16 GHz, 2 GB RAM) 환경의 컴퓨터에서 수행하였다.

3.1 실험계획

기상청에서 풍향, 풍속정보와 국립해양조사원에서 제공하는 실시간 해류정보를 기반으로 Fig. 8과 같이 격자형 지도를 구성하였다. 격자 내 육지나 섬과 같은 지형 및 항행위험지역은 격자 통과시간을 무한대(Infinite)로 설정하여 알고리즘 상 항해경로에서 배제하도록 하였다.

바람과 파는 기상청의 정보를 바탕으로 바람의 세기를 단계화 한 수치는 $BN = 3 + \theta(3.3\cos(x)\sin(y))$ 로 설정하여 계산하였다. 여기서 x 는 위도, y 는 경도를 나타낸다^[17]. 실험항로는 해류의 변화가 심한 서해를 기준으로 인천항에서 제주도 서귀포항을 항해하는 것으로 설정하였다. 선박의 항해법은 연료소모량을 최소화하는 것으로 알려져 있는 고점추력항해법을 적용하였으며, 선박의 속력은 Kim et al.^[11]이 제시한 외력조건에서 최소연료소모량을 최소로 한다는 15 knot로 설정하였다.

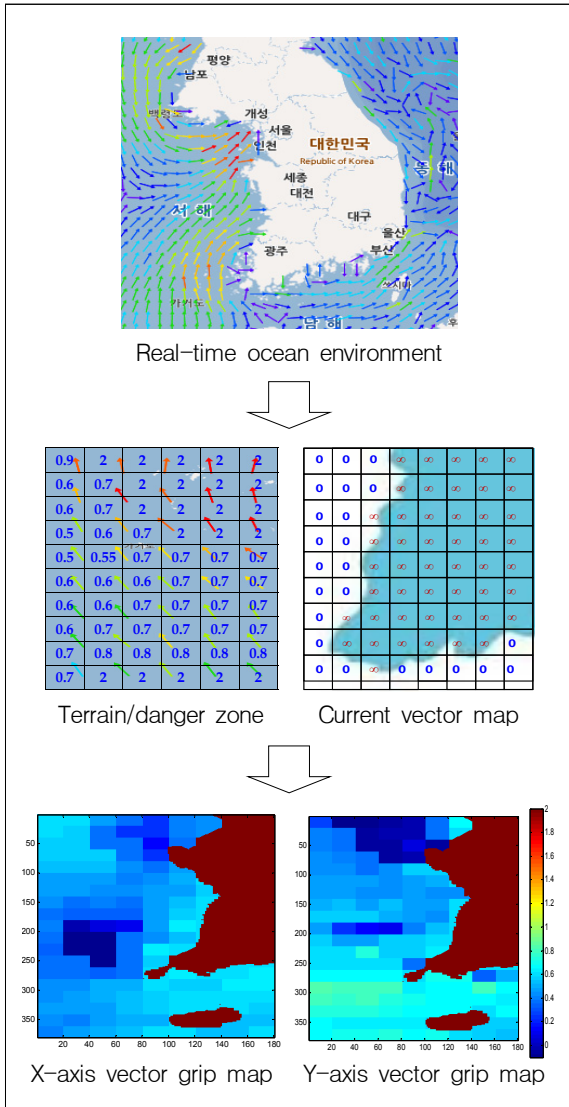


Fig. 8. Grid map based on real-time ocean environment data

3.2 결과분석

Fig. 12는 2015년 4월 21일 11시 해양 정보를 바탕으로 생성된 격자지도 Fig. 9에서 인천항에서부터 제주도 서귀포항까지 항해하는 경우의 최적경로를 지도 상에 표시한 결과이다. Fig. 10의 붉은 색 실선은 A* 알고리즘을 이용한 결과이고, 노란색 점선은 A* 알고리즘의 경로에 Path smoothing을 함께 적용한 결과이다. Table 1 실험결과에서 나타난 것처럼 A* 알고리즘 경로는 인천항에서 서귀포항까지 총 20.37시간이 소요

되었으나 Path smoothing을 함께 적용하는 경우, 40분이 단축된 총 19.71시간이 소요되는 것을 확인할 수 있었다. 반대로 서귀포항에서 인천항으로 이동하는 예제에서는 A* 알고리즘만 적용하는 경우는 19.53시간, Path smoothing을 함께 적용하는 경우는 18.93시간으로 Path smoothing을 함께 적용했을 때 시간을 단축하는 경로를 생성하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Simulation result (4. 21. 11:00) (hour)

	A* algorithm	A* with PS
Incheon → Seogwipo	20.37	19.71
Seogwipo → Incheon	19.53	18.93

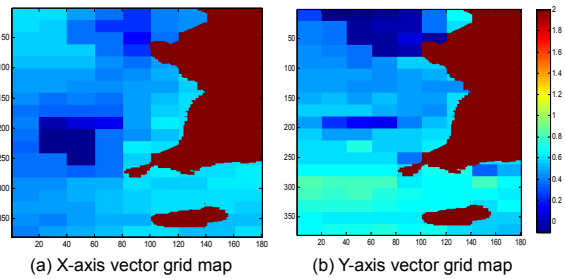


Fig. 9. Ocean environment grid map(4. 21. 11:00)

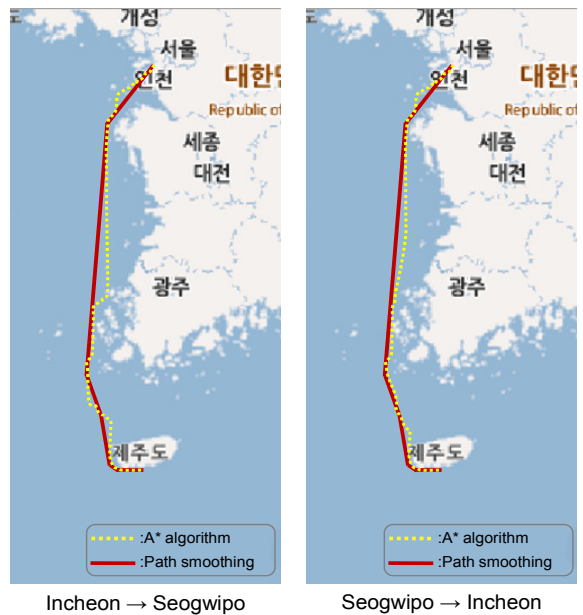


Fig. 10. Optimal ship route(4. 21. 11:00)

다음은 동일한 항로에서 시간에 따른 해류의 변화가 최적항로에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 인천항에서 서귀포항으로 가는 경우를 기준으로 2015년 4월 21일 오전 11시와 오후 7시로 출항시간을 다르게 하여 비교실험을 수행하였다. Fig. 11은 오후 7시의 해류벡터를 나타낸 것으로 오전 11시의 해류벡터를 나타내는 Fig. 9와 비교했을 때 전혀 다른 흐름을 갖는다는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 오전 11시와 오후 7시의 최적항로를 지도상에 나타낸 것이다. Fig. 13은 오후 7시 항로의 선박 추력방향에 대한 그래프로 추천 항로로 항해하기 위해 항해사가 조정해야 할 시간별 추력방향을 제시한 것이다. 이 실험 역시 Table 2에 나타낸 것처럼 A* 알고리즘보다 Path smoothing을 함께 적용하는 경우 항해시간이 단축된 최적항로를 제공하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 오전 11시에는 제주도를 기준으로 제주도를 반시계방향으로 돌아 서귀포항으로 진입하는 반면에 오후 7시에는 제주도를 시계방향으로 돌아 서귀포항으로 진입하는 결과를 통해 실시간 해류의 변화가 최적항로를 결정하는데 중요한 요인임을 확인할 수 있었다.

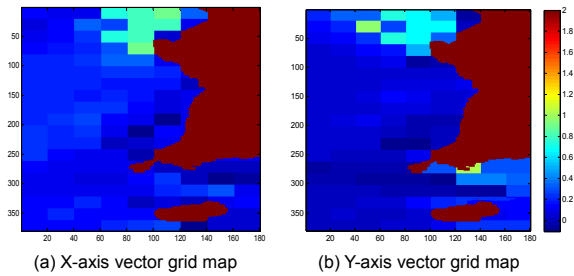
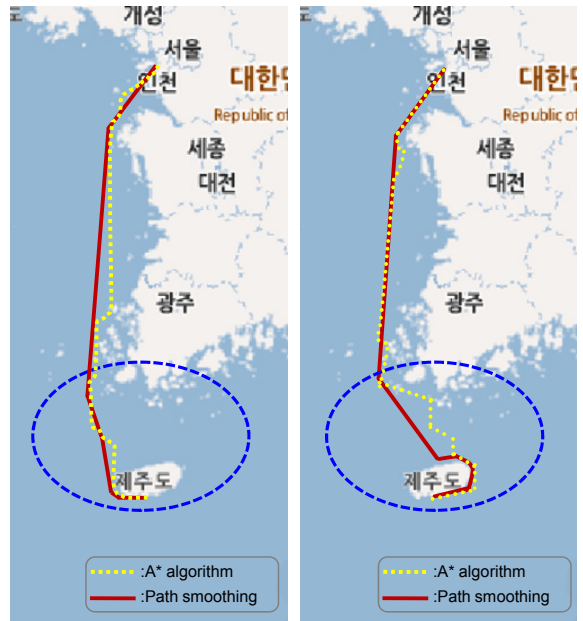


Fig. 11. Ocean environment grid map(4. 21. 19:00)

Table 2. Simulation result(4. 21. 19:00) (hour)

	A* algorithm	A* with PS
Incheon → Seogwipo (11:00)	20.37	19.71
Incheon → Seogwipo (19:00)	19.92	18.83



(a) Incheon → Seogwipo ('15. 4. 21. 11:00) (b) Incheon → Seogwipo ('15. 4. 21. 19:00)

Fig. 12. Comparison of optimal ship route according to the time(current change)

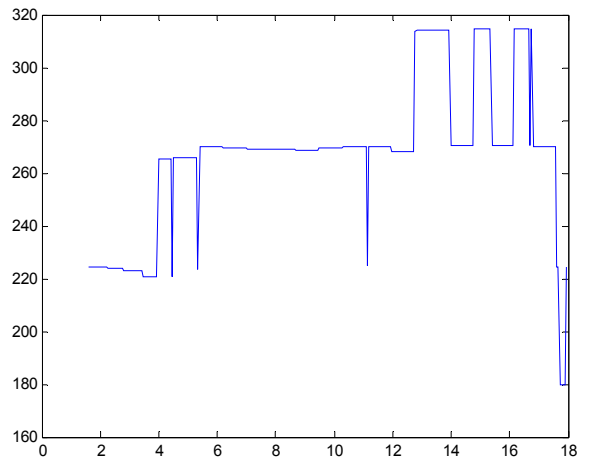


Fig. 13. Thrust vector per time

4. 결론

본 논문에서는 선박의 실시간 해양환경에 따른 최적항로 도출을 목적으로 기상청, 국립해양조사원의 실

시간 해양환경정보, 지형정보 및 안전정보를 바탕으로 격자지도를 구성하고 A* 알고리즘 및 Path smoothing method를 적용하여 항해 시 사용하는 연료소모율을 최소로 하는 최적항로계획 알고리즘을 제시하였다. 또한 A* with Path smoothing method 적용 시 실제 선박이 이동한 거리를 계산하여 이를 바탕으로 목적함수를 개선함으로써 선박의 현재 위치, 진입하는 방향, 환경 요인 등을 실질적으로 반영할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 알고리즘을 통해 제시된 최적항로로 항해하기 위해서 항해사가 조종해야 할 추력방향 역시 제시함으로써 항로이탈로 인한 불필요한 연료소모나 사고발생가능성을 최소화할 수 있도록 하였다.

본 연구에 이어 향후 연구에서는 실제 해양환경이나 선박의 운동과 관련한 세부적인 제약조건을 추가로 고려하여 복합적인 정보를 바탕으로 한 무인체계(함정, 항공기 등)의 이동경로 생성 및 제어에 관한 연구가 필요할 것으로 보이며 실시간 해양환경을 기반으로 한 함정배치 및 순회이동 문제 등에 관한 폭넓은 연구가 이루어져야 할 것이다.

References

- [1] Bui, L. D. and Kim, Y. G., "A New Approach of BK Products of Fuzzy Relations for Obstacle Avoidance of Autonomous Underwater Vehicles," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-141, 2004.
- [2] Botea, A., Muller, M., and Schaeffer, J., "Near Optimal Hierarchical Path-Finding," *Journal of Game Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-28, 2004.
- [3] Cho, J. H., Ji, M. S., and Kim, Y. G., "An Route Planning for the Navigation System of Autonomous Vessel," *Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 418-424, 2005.
- [4] Christiansen, M., Fagerholt, K. and Roren, D., "Ship Routing and Scheduling: Statue and Perspectives," *Tansportation Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-18, 2004.
- [5] Hart, P. E., Nilson, N. J. and Raphael, B., "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," *IEEE Transaction of Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, 1968
- [6] Hanssen, G. L. and James R. W., "Optimum Ship Routing," *The Institute of Navigation*, Vol. 13, No. 3, 1960.
- [7] Jang, I. S. and Park, S. H., "A Genetic Algorithm for Searching Shortest Path in Public Transportation Network," *Korean Management Science Review*, Vol. 18, No. 1, 2001.
- [8] Journée, J. M. J., and Meijers, J. H. C., *Ship Routing for Optimum Performance*, Delft University of Technology, 1980.
- [9] Jung, J. S. and Rhyu, K. S., "A Study on the Optimal Navigation Route Decision using A* Algorithm," *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, Vol. 4, No. 1, pp. 38-46, 1999.
- [10] Kim, K. T. and Jeon, G. W., "A Path Planning to Maximize Survivability for Unmanned Aerial Vehicle based on 3-dimension Environment," *IE Interface*, Vol. 24, No. 4, pp. 304-313, 2011.
- [11] Kim, S. K., Lee, Y. S., Kong, G. Y., Kim, J. P. and Jung, C. H., "A Study on the Ship's Speed for Reducing the Feul Oil Consumption in Actual Ships," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-47, 2012.
- [12] Kwon, Y. J. and Kim, D. Y. "A Research on the Approximate Formulae for the Speed Loss at Sea," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 90-93, 2005.
- [13] Lee, H. Y. and Kim, S. H., "On the Optimum Ship Routing by Network Modeling", *Journal of the Korean Institute of Navigation*, Vol. 25, No. 3, pp. 211-223, 2001.
- [14] Maki, A., Akimoto, Y., Nagata, Y., Kobayashi, S., Kobayashi, E., Shiotani, S., Ohsawa, T., Umeda, N., "A New Weather-Routing System That Accounts for Ship Stability based on a Real-Coded Genetic Algorithm," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 311-322, 2011.
- [15] Montes, A. A., "Network Shortest Path Application for Optimum Track Ship Routing," *Naval Postgraduate School*, 2005.
- [16] Padhy, C. P., Sen, D. and Bhaskaran, P. K., "Application of Wave Model for Weather Routing

- of Ships in the North Indian Ocean,” *Natural Hazards*, Vol. 44, pp. 373-385, 2008.
- [17] Park, J. M. and Kim, N. W., “A Comparison and Analysis of Ship Optimal Routing Scenarios Considering Ocean Environment,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 51, No. 2, pp. 99-106, 2014.
- [18] Tolga, Y and Abdullah, S., “An Implementation of Path Planning Algorithms for Mobile Robots on a Grid based Map,” Citeseer, 2008.
- [19] Townsin, R. L. and Kwon, Y. J., “Estimating the Influence of Weather on Ship Performance,” *Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 135, pp. 191-209, 1993.