

## 네트워크 모형화에 의한 최적 항로 결정

이 희 용\* · 김 시 화\*\*

On the optimum ship routing by network modeling

*Hee-Yong Lee\* · Si-Hwa Kim\*\**

Abstract	4. 네트워크 모형에 의한 최적항로 결정
1. 서 론	5. 계산 실험
2. 최적항로결정문제	6. 결 론
3. 관련 연구	

### Abstract

Optimum Ship Routing can be defined as "The selection of an optimum track for a transoceanic crossing by the application of long-range predictions of wind, waves and currents to the knowledge of how the routed vessel reacts to these variables". This paper treats the methodology how to solve optimum ship routing problem by network modeling and reveals the validity of the network model by some numerical experiments.

### 1. 서 론

최적 항로 계획 또는 결정이란 『渡洋(transocean)할 때, 바람, 파도, 해류에 대한 선박의 반응을 적절히 적용하여 최적인 경로를 선택하는 것』[6]으로 정의할 수 있는데 선행 연구에서는 Optimum Track Routing, Weather Routing, Optimum Ship(Vessel) Routing 등으로 표현된다. 최적항로결정에서 최적

화의 목적은 항해 중 화물, 승객, 선체에 대한 안전을 확보하면서 연료 소비나 항해 시간을 최소화 하는 것이다.

예로부터 선장은 경험적으로 기상이나 선박 상태를 고려하여 가장 적절한 최적의 항로를 선택하고 항해하여 왔다. 우리나라의 경우 오랫동안 바다를 통하여 중국, 일본과 교류를 하고 있었으며 정치 외교 경제적 여건이 성숙되는 통일신라시대

\* 한국해양연구소 연구원

\*\* 한국해양대학교 해사수송과학과 교수

에 당과의 해상무역이 가장 활발하게 되었다.[29] 이 시기에는 이미 해류 및 바람을 이용한 계절항로를 통해 동해를 제외한 한국 연안, 중국 서안, 일본 항로를 통한 활발한 교류가 있었음을 알 수 있다.

서양에 있어 역사적으로 알려진 최초의 Weather Routing은 항해사 헨리가 무역풍을 활용했던 14세기로 거슬러 올라간다. 항해사 헨리가 베니스 상인과 아랍인의 무역권을 빼앗고자 인도양으로 들어가는 희망봉 주변의 항로를 찾기 위해 적도지역을 항해한 것이 Weather Routing의 좋은 예이다.[2]

이미 수세기 전부터 선장의 경험을 활용하여 최적항로를 결정하였지만 해류나 파도에 대한 장기기상예측을 활용한 것은 비교적 최근의 일이다. 근대적인 Weather Routing의 초기 사용자로는 1847년 Matthew Maury로 볼 수 있다[6]. 그는 북대서양의 바람과 해류에 대한 선원의 경험을 수집하여 정리하고 이를 Chart로 작성하였으며 이를 이용하여 NewYork에서 Rio de Janeiro까지 항해하는데 있어 항해시간을 반으로 단축하였다. 1950년대 이후에 Weather Routing에 관한 연구가 많이 수행되었으며 본격적인 Weather Routing의 상용서비스가 실시된 것은 2차 대전 이후이다.

본 연구에서는 최적항로결정 문제를 네트워크 문제로 모형화하고 이를 개선된 깊이우선탐색 알고리즘을 이용하여 해결한다.

### 2. 최적항로 결정 문제

구면인 지구상의 출발점  $(X_s, Y_s)$ 에서 도착점  $(X_d, Y_d)$ 까지 가장 빨리 가는 방법은 두 지점을 잇는 대권(Great Circle)의 경로를 따라 항행하는 것이다. 하지만 대권의 경로를 따라 항행하는데 방해가 있는 경우에는 방해가 없는 다른 경로를 택하는 것이 항행시간을 줄일 수 있다. 이 경우 최단 경로란 경로 상의 방해정도와 거리의 관계에 따라 정해진다.

최적항로결정이란 기상이나 해상 상태를 고려하여 항행시간, 연료소비 등을 최소화 하는 항로를 찾는 것이며 의사결정 변수는 선박을 제어하는 침로와 선속이 된다.

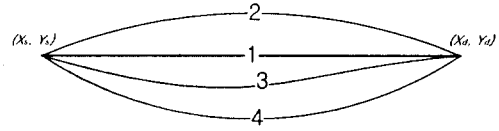


그림 1. 구면상 두 점을 연결하는 경로

대양을 항해하고 하고 있는 선박의 동특성(kinematics)은 선박의 위치와 시간으로 표현된다.[2] 선박의 위치  $P$ 와, 엔진 출력과 침로 결정에 대한 제어변수  $C$ , 그리고 시간  $t$ 로 정의되는 항해비용과 도착시간  $t_f$ 에 따른 항구비용  $B$ 를 최소화하는 최적항로계획 문제는 식 (1)과 같다.

Minimize :

$$I = \int_s F(P, C, t) ds + \omega B(t_f) \dots\dots\dots (1)$$

- $F(P, C, t)$  : 항해 중 단위 거리당 비용
  - $B(t_f)$  : 도착시간에 따른 항구 비용
  - $\omega$  : 항구비용을 항해비용에 반영하는 가중치
  - $t_f$  : 도착 시간
- 단,  $P \in R, C \in C_A$

선박위치변수  $P$ 와 제어변수  $C$ 를 시간  $t$ 의 함수로 보면 비용  $I$ 를 최소화 하는 제어  $C^*(t)$ 를 최적 제어라 하고 이 때의 경로  $P^*(t)$ 가 최적항로가 된다. 단위 거리( $ds$ )당 비용은 항해 시간, 연료소비량, 내항성 비교치 등이 된다.

$\omega$ 를 0으로 하면 도착항에서의 비용은 무시한다는 의미이며 0이 아니면 도착 시간이 주어졌을 경우 조기 도착이나 지연에 대한 벌점항이 된다.  $R$ 은 항해 가능 영역,  $C_A$  허용 엔진 출력 및 변침 범위가 된다.

### 3. 관련 연구

최적항로결정 문제는 크게 Isochrone Method, N-Stage Dynamic Programming, Calculus of Variation의 3가지 유형으로 구분되는데 컴퓨터의 이용이 용이한 가장 실용적인 최근의 연구로는 Isochrone

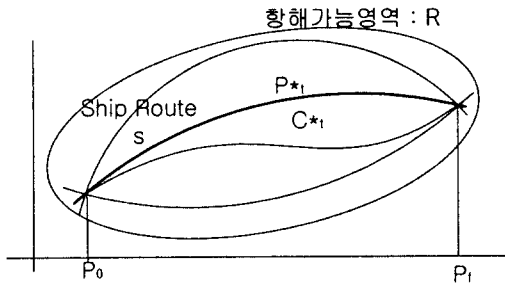


그림 2. 항해가능영역에서의 최적항로

Method를 개량한 Hagiwara의 연구를 들 수 있다.  
[4]

### 3.1 Isochrone Method

Isochrone Line(Time-Front)란 주어진 한점에서 주어진 시간 동안 항해하여 도착하는 할 수 있는 점들을 연결한 선들을 말한다. (그림 3) 만약 해상상태가 일정하다면 Isochrone Line은 원이 된다.

Hanssen G.L.과 R.W. James[6]에 의해 제안된 Isochrone Methods는 수계산이 용이하기 때문에 오랫동안 사용되어 왔으며 Hagiwara가 컴퓨터 계산이 용이한 변경된 등시간법을 고안하였다.

Isochrone Methods의 최단경로를 찾는 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

- 단계 1. 출발점과 도착점을 대권으로 연결한다.
- 단계 2. 출발점에서 해상상태를 고려하여 하룻 동안 갈 수 있는 점들을 연결하여 Isochrone Line( $S_1$ )을 작성한다.

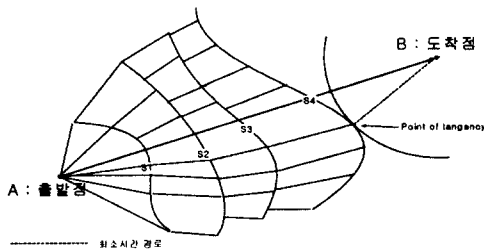


그림 3. 최소 시간 경로

- 단계 3. 곡선  $S_1$ 에서 수선 방향으로 하룻동안 갈 수 있는 점들을 계산하여 곡선  $S_2$ 를 작도한다.
- 단계 4. 같은 요령으로 도착점을 포함하지 않는 곡선까지 반복한다. (그림 3)
- 단계 5. 마지막 곡선  $S_j$ 에서 도착점까지의 가장 가까운 접점(Point of tangency)를 결정한다.
- 단계 6. 접점(Point of Tangency)에서 역으로 출발지까지 경로를 연결하면 최단 경로가 된다.

### 3.2 N-Stage Dynamic Programming

N-Stage Dynamic Programming(이하 동적 프로그래밍)은 항해영역을 일정한 구역으로 분할하고 이들 각 구간의 경계점을 연결하는 경로를 후보경로로 하여 최소비용 경로를 구한다. 동적 프로그래밍에 의한 최적항로 결정은 출발 시각  $T_0$ 가 정해지고 선박의 초기위치가 명시된 상황에서 단계별 선박의 위치  $(X, Y, T)_k, k=1,2,\dots,N$ 로 구성된 선박의 궤적(Trajectory)과 그에 상응하는 제어  $C_k$ 를 구하는 것이다. 제약 조건은 다음과 같다.

- 육지, 섬, 항해위험 지역을 피해야 할 것
- 전 항해에 걸쳐 주어진 선체운동이 내항성 범위 내에 있어야 할 것
- 주어진 엔진출력과 변침 범위를 벗어나지 않을 것 등이다.

### 3.3 변분법

변분은 적분으로 표현된 양을 최소화 시키는 문제에 적용된다.[24] [25] 간단한 예로

Minimize :

$$J = \int_{x_1}^{x_2} f(y, y_x, x) dx$$

라는 문제를 고려해보자. 이 문제는  $f$ 가 미지의 함수인 경우에 (적분기호 안의  $f$ 는  $y(x)$ 가 미지의 함수이므로  $y$ 의  $x$ 에 대한 종속 여부를 알 수 없고

$x_1$ 에서  $x_2$ 까지 적분 경로도 알 수 없다) 적분치  $J$ 가 최소가 되는  $y(x)$ 를 구하는 문제이다. 최적항로 계획에서의 함수  $f$ 는 위치와 시간으로 정해지는 비용함수이다. 이는 위치에 시간에 따른 해상상태에 따른 선박의 동특성을 반영하며 해상상태가 변함에 따라 비용의 계산이 틀러지게 된다. 변분법에 의한 최적 항로 결정은 경로상의 비용 적분치  $J$ 를 최소로 하는 문제이며 비용이 최소가 되는 적분 경로  $y(x)$ 를 구하는 것이다. [12][13][14]

#### 4. 네트워크 모형화에 의한 최적항로 결정

##### 4.1 네트워크 구성

네트워크는 그래프에 수치 파라미터가 있는 그래프의 특수 형태이다. 그래프 이론은 오일러에 의해 최초로 발표된 이후 많은 연구가 수행되었으며 컴퓨터의 출현과 선형 계획법의 발견에 의해 크게 발전되었다.[17] 본 연구에서는 N-Stage Dynamic Programming의 그리드(Grid)를 개선하여 변침점을 교점으로 하는 네트워크로 구성하고 이를 변형된 깊이우선탐색 알고리즘을 이용하여 해결한다. 하지만 선행연구에서와는 달리 항법에 기초하여 교점을 생성하므로 보다 실용적인 항로를 도출할 수 있다.

##### 4.1.1 교점의 구성

네트워크의 각 노드는 출발점과 가능한 모든 변침점으로 구성된다. 여기서 노드의 구성방법을 결정하기 위해선 기존의 항해방법을 검토한 후 이를 바탕으로 네트워크의 노드를 구성하는 방법을 설명한다. 두 지점간을 항해 하기 위한 항법은 크게 항정선 항법과 대권항법으로 구분된다. 항정선 항법은 점장도법으로 제작된 해도(Navigation Chart)를 이용하여 도착 針路나 航程을 계산하는 항법이다. 해도 상에 직선으로 작도하면 항정선이 되므로 실무에 사용하기 편한 장점이 있다.

대권항법은 항정선 항법과 비교하여 거리를 단축하고 연료를 절약할 목적으로 지구 표면에 있는

大圈을 따라 항해하는 항법이다. 대권은 점장도상에 곡선으로 표현되기 때문에 실무에서는 해도상에 작도하기가 힘들며 항해함에 따라 자오선과 만나는 각이 계속 변하기 때문에 자이로 콤파스를 기준으로 항해하기도 힘들다.

따라서 실무에서 대권항법은 대권상의 항해 구간을 적절한 등간격으로 나누어 각 구간을 항정선 항법으로 항해하게 된다. 실무에서는 대권계산이 번거로우므로 적도지방에 가깝거나 항정이 짧은 경우에는 편의상 항정선 항법을 사용하게 된다. 즉, 대권항법의 계산이 용이하다면 굳이 항정선 항법을 사용할 이유가 없다. 이러한 점에 착안하여 네트워크 교점이 되는 변침점은 대권 항법을 기준으로 생성한다.

네트워크  $G^*$ 를 구성하기 위해선 대권을 중심으로 하는 후보 항로를 구하고 이들 후보 항로의 변침점으로 네트워크의 교점을 구성한다. 후보항로를 설정하기 위해서는 출발점과 도착점을 잇는 대권을 크게 벗어나지 않는 항로를 설정하는 것이 중요하다. 이는 초기침로  $A_2$ 에 침로 범위  $\delta$ 를 벗어나지 않는 초기침로  $A_2'$ 를 갖는 대권들을 구하는 것이 된다.

$$A_2 - \delta \leq A_2' \leq A_2 + \delta$$

대권항법[20]에서는 정점(Vertex)을 기준으로 정점에서 일정한 거리만큼 떨어진 점들을 구하여 이를 변침점으로 사용하고 있으나 본 연구에서는 그러한 방법을 적용하지 못한다. 정점(Vertex)은 대권 상에서 극에 가장 가까운 점을 의미하므로 대권상의 정점은 항로의 바깥에 존재할 수 있기 때문이다. 변침점 네트워크  $G^*$ 를 구성하기 위해서는 대권상의 정점을 기준으로 하는 것이 아니라 출발점과 도착점에서 같은 거리에 있는 점을 기준으로 해야 한다. 출발점과 도착점을 잇는 대권을 基準大圈이라 하고 기준대권 상의 출발점과 도착점에서 같은 거리에 있는 점을 中間點이라 하며 중간점을 적당한 거리만큼 이동시킨 점을 중간점 집합이라 하자. 출발점과 중간점 집합, 중간점 집합과 도착점을 연결하는 대권들이 후보항로가 되며 중간점 집합을

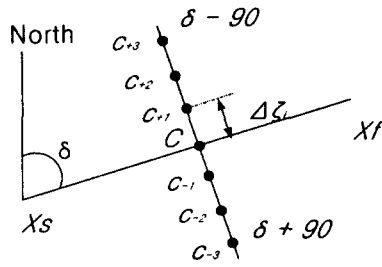


그림 4. 중간점을 구하는 방법

구하는 방법은 다음과 같다.

- 단계 1. 출발점과 도착점에서 같은 거리에 위치한 점 C를 구한다.
- 단계 2. 출발점  $X_s(Lat_1, Lon_1)$ 와 도착점  $X_f(Lat_2, Lon_2)$ 간의 침로  $\delta$ 를 구한다.
- 단계 3.  $\delta$ 에 수직인 항정선  $\delta - 90$ 과  $\delta + 90$ 을 구한다.
- 단계 4.  $\delta \pm 90$  방향으로  $\zeta_i$ 만큼 이동 시킨점  $c_{\pm i}$ 를 구한다. 단,  $\zeta_{i+1} = \zeta_i + \zeta$
- 단계 5. C와  $c_{\pm i}$ 가 중간점 집합이 된다.

침로  $\delta$ 는

$$\delta = \cos^{-1}(D_{RL} / l),$$

단,  $D_{RL}$ 은 점장항정,  $l = Lat_2 \sim Lat_1$  : 변위

에 의해 구하고[20] 기준대원 상의 중간점 C를 구하기 위해서는 구면삼각형의 코사인 법칙에 따른 공식을 변형하여 대원거리의 반을 구하는 공식을 유도한 후, 출발점에서 일정거리 떨어진 점의 위치를 구하는 공식을 유도하여 이들 공식을 사용하여 중간점의 경위도를 구한다. 먼저 출발침로  $A_2$ 를 구해야 하는데 이는 출발점과 도착점의 위도와 항정에 의해 구한다. [20]

$$\text{hav } A_2 = \sec L_1 \text{ csc } D$$

$$[\text{hav } coL_2 - \text{hav } (D \sim coL_1)]$$

단,  $\text{hav } A = \sin^2 \frac{A}{2}$   
 $A_2$  : 초기 침로,  $L_1$ : 출발점 위도,

$coL_2$  : 도착점의 여위도,  $D$  : 항정

또한 항정  $D$ 는

$$D = \sin^2 Lat_1 \sin Lat_2 + \cos Lat_1 \cos Lat_2 \cos DL_0$$

로 구한다.[20] 출발점과 도착점까지의 대원거리  $D_{gc}$ 의 반은 구면삼각형의 코사인 법칙에서 유도한 공식

$$\sin(D_{gc}/2) = \left[ \frac{\sin^2(Lat_2 - Lat_1)/2 + \cos(Lat_1)\cos(Lat_2)}{\sin^2[(Lon_2 - Lon_1)/2]} \right]^{1/2}$$

에 의해 구하고 한 점(위도  $\phi_1$ , 경도  $\lambda_0$ )에서 대원의 초기침로  $A_2$ 방향으로 거리  $g$ 만큼 떨어진 점(위도  $\phi$ , 경도  $\lambda$ )은

$$\phi = \arcsin(\sin \phi_1 \cos c + \cos \phi_1 \sin c \cos Az)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \arctan \left[ \frac{\sin c \sin Az}{\sin \phi_1 \sin c \cos Az} \right]$$

.....(2)

에 의해 구한다. 이렇게 대원상의 중간점을 구한 후  $\delta - 90$ 과  $\delta + 90$  방향으로  $\zeta_i$  단,  $\zeta_{i+1} = \zeta_i + \zeta$  만큼 이동 시킨점  $c_{\pm i}$ 를 구하면 후보항로의 중간점이 된다.

출발점과 중간점 집합의 점, 중간점 집합의 점과 도착점을 연결하는 다수의 대원을 생성하고 각 대원의 변침점을 구하는 대원항법[20]을 이용해 변침점을 구하면 네트워크  $G^*$ 의 모든 교점을 구한 것이다. 단, 정점을 기준으로 변침점을 구하는 것이 아니라 대원 거리  $D_{gc}$ 를 일정한 거리  $d$ 로 나누어 변침점을 구하는데 출발점에서 일정거리에 있는 점을 구하는 공식 (2)를 사용한다.

이렇게 구한 변침점의 예를 그림 5에 보인다. 실선으로 표현된 것이 출발점과 도착점을 잇는 기준대원이며 기준대원 주위 일정한 범위 내에 변침점이 분포한 것을 볼 수 있다. 다단계 동적 프로그래밍의 경우에 비해 실용적인 변침점으로 네트워크가 구성되었음을 알 수 있다.

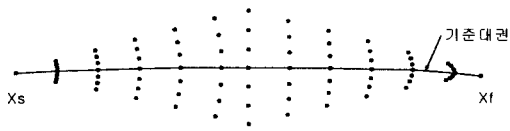


그림 5. 생성된 교점과 기준 대권

4.1.2 호의 구성

앞 절에서 설명한대로 교점을 구하였으면 각 교점을 연결하는 호를 구성해야 한다. 각 교점간을 항해하는데 가장 짧은 거리인 대권을 따라 항해하면 되지만 현재까지 나와있는 항법으로는 정확히 대권 위를 항해할 수 없다. 고로 각 교점간을 항해하는데는 점상항법을 사용한다.

항해의 출발점이 되는 교점을  $n_s$ 라 하면 초기 항해 시작 시에는  $n_s = X_s$ 가 된다.  $n_s$ 에서 다음 변침점으로 가능한 교점  $n_i, i \neq s$ 을 후보교점이라 하자.  $n_s$ 와  $n_i$ 의 침로를  $\delta_i$ , 항정을  $d_i$ 라 하고  $n_s$ 에서  $n_i$ 까지의 변침 제한범위를  $\theta$ 라 하고 제한 항정을  $D$ 라고 하면  $n_i$ 가 후보교점이 되는 조건은  $d_i \leq D, \delta_i < \theta$  이 된다.

4.2 해법

4.2.1 네트워크 목적함수

네트워크 모형의 목적 함수는 최소 시간, 최소 연료 소비, 안전도 등으로 표현된 항해비용과 항구 비용으로 구성되는 네트워크의 비용을 최소로 하는 것이다. 실질적인 최적항로 계획을 위해서는 기후 예측도 및 기상 자료, 대강의 파도 해도(파고, 파주기, 파향, 등파고선), 파도 예측도(스웰이 있는 경우) 등이 필요하지만 본 연구에서는 이러한 자료들

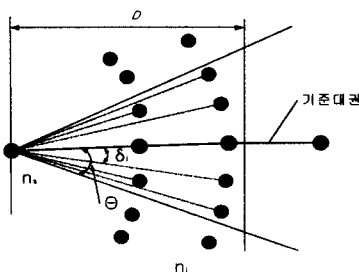


그림 6. 호의 구성

을 단순화하여 파도와 해류의 정보만을 사용한다. 즉, 추정 선속과 도착시간에 따른 항구비용만을 비용요소로 고려한다. 이러한 각 비용요소에 대해 가중치를 고려한 목적함수를 표현하면 다음과 같다.

Minimize :

$$J = \sum_{i \in I} T_i + C_p^I \dots\dots\dots (3)$$

$T_i$  : 변침점  $i-1$ 에서  $i$ 까지의 항해시간

$C_p^I$  : 도착시간  $T$ 에 따른 항구 비용

$I$ 는 선택된 항로상의 모든 변침점

최적항로 계획에서의 의사결정 변수는 일반적으로 침로와 속력이지만 본 연구에서는 속력은 고정하고 침로를 결정하는 것으로 한다. 이는 네트워크상의 경로를 선택하는 것으로 문제가 축소되는 장점이 있다.

4.2.2 비용계산

컴퓨터 계산을 위해서 바람, 해류의 영향에 대한 선속 감소치를 가정하여 사용한다. 임의로 선속 감소치를 사용하면 실제 항해에 사용할 수 있는 최적항로는 도출하지 못하지만 주어진 비용에 따른 최적항로는 도출할 수 있으며 민감도 분석 등을 수행하여 네트워크 모형의 유용함을 보일 수 있다.

1) 선속 감소의 추정

파도에 의한 선속 감소는 파고와 파주기 및 파향에 따라 달라지는데 본 연구에서는 파고와 파향만을 고려한다. 파향은 선수파, 횡파, 선미파로 나누어 고려하고 파도의 세기로는 파주기는 제외하고 파고만 계산한다. (표 4)

실제 계산에 사용된 파고와 선속 감소의 관계는 그림 7과 같다. 해류에 대한 선속 감소는 순조와 역조 두 가지로 고려하며 순조와 역조는 그 절대값은 같고 부호만 반대인 것으로 가정한다. 그림 8에 그 변화 추이를 보인다. 파도의 영향에 의한 선속감소치를  $v_w$ 라 하고 해류의 영향에 의한 선속 감소치를  $v_c$ 라 하면 주어진 선속  $v$ 에 대한 최종 선속  $v'$ 는  $v' = v - (v_w + v_c)$ 로 계산된다.

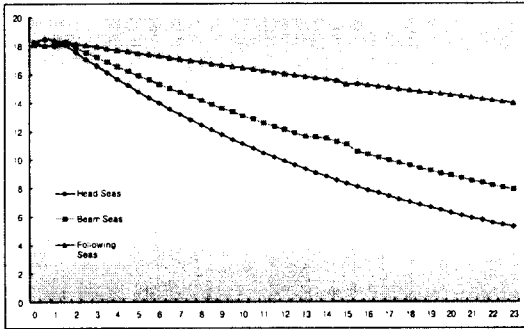


그림 7. 파고에 대한 선속 감소

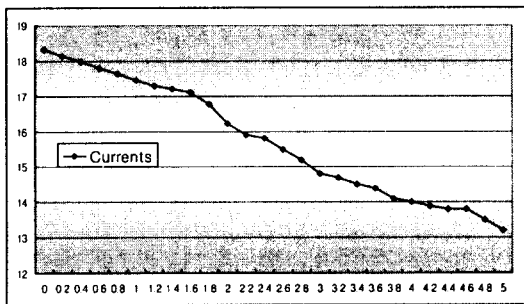


그림 8. 해류에 따른 선속의 감소

이러한 방법으로 기상정보에 대한 선속 감소를 추정하였으면 기상셀과 항로의 관계에 따른 항해비용을 계산하여야 한다. 항정선  $s$  위의 한 점  $n$ 에서 시간  $t$ 에 정의되는 비용함수  $f(n, t)$ 라 하면 비용은  $\int_s f(n, t) ds$ 로 정의된다. 변침점  $n_s$ 에서 변침점  $n_i$ 까지의 비용을 구하려면  $n_s$ 와  $n_i$  사이의 항정선  $s$ 와 각 기상셀  $c_i$ 가 만나는 교점  $\omega_i$ 에 대해,  $\omega_i$ 에 대한 비용을 구하여 합하면 된다. 각  $\omega_i$ 간의 항정은 점장항정이 된다. 다음 그림 9는 항해시간을 비용으로 계산하기 위한 항정성과 기상셀의 정보를 보여준다.

$n_s$ 에서  $n_i$ 까지의 항해 시간은

$$T_i = T_s + \sum_{j=1}^i \frac{d_j}{v - (\xi_i + \xi_j)}$$

$T_s$  : 변침점  $n_s$  통과 시간

$J$  = 침로선이 기상셀과 만나는 교점의 수

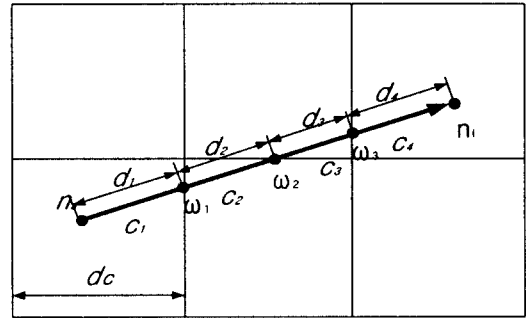


그림 9. 비용 계산 방법

$d_j = \omega_j$ 의 항정,  $v$  : 정수중 선속,

$\xi_j$  : 해류에 의한 선속 감소치,

$\xi_i$  : 파도에 의한 선속 감소치

이 된다. 비용 평가 함수  $\frac{d_j}{v - (\xi_i + \xi_j)}$ 는 항해시간을 의미한다.

도착점  $n_i$ 까지의 항해 시간  $T_i$ 는  $T_i = \sum_{j=1}^i T_j$  ( $T_j$  : 주어진 항로상의 모든 변침점의 수)가 된다. 도착 시간  $T_i$ 에 따른 도착지점  $X_i$ 에서의 항구비용을  $B(X_i, T_i)$ 라 하면 항구비용을 고려한 비용은  $J = \sum_{i=1}^n T_i + B(P_i, T_i)$ 가 된다.

### 2) 항구 비용의 계산

선박의 비용이란 관점에 따라 다르게 해석된다. 선주의 입장에서 선박 비용이란 선박 구입비, 선원비, 연료비, 항비, 일반 관리비 등이며 화주의 입장에서는 선박 사용에 따라 지급하는 비용, 즉 용선료, 운임료 등이 된다.

본 연구에서는 항구비로 고려되는 제반 요소를 간단히 하여 도착시간을 기준으로 지연시간에 대한 벌점만을 고려한다. 도착 시간을 기준으로 한 호의 비용은 그림 10과 같다. 빨리 도착하는 것이나 늦게 도착하는 것이나 같은 값의 추가비용이 발생한다고 가정한다.

### 3) 수치계산 예

파고와 바람에 대한 선속 감소의 추정을 위해서는 기상셀에 대한 시간당 기상 자료가 필요하다.

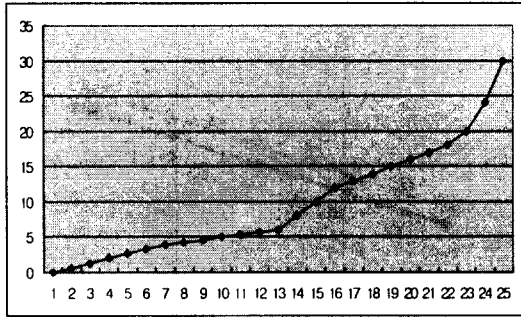


그림 10. 도착시간에 따른 추가 비용

기상셀  $c_1$ 과  $c_2$ 에 대한 기상 정보는 표 4와 같다. 파도 방향의 정의는 선수방위선과 보조파가 이루는 각  $\mu$ 를 기준으로 한다.  $\mu$ 의 값에 대해  $\pm 45$ 도를 기준으로 선수파, 정횡파, 선미파를 결정하며 해류의 방향은 편의상 정횡선을 기준으로 순조와 역조를 구분한다.

먼저 호의 비용을 구하는 방법을 설명한다. 정수 중 속도  $v = 18.0 \text{ kts}$ , 침로 90도인 경우를 그림 11에 보인다. 그림 11의  $n_s$ 와  $n_i$  사이의 항정선  $s$ 와 각 기상셀  $c_j$ 가 만나는 교점  $\omega_j$ 가 한 개인 경우를 가정하자.  $d_1 = 120'$ ,  $d_2 = 160'$ 이라 하자.

기상셀  $c_1$ 에서의 추정 선속은 다음과 같다.

파도 정보는  $T_s = 0$ 일 때 표 4에 의해 파고 14미터, 파향 : 10도 정횡파이고 이때의 감속된 선속은 그림 7에 의해 11.5 kts이다. 해류 정보는 표 4에 의해 유속 : 3.5kts, 유향 10도 역조이며 이때의 감속된 선속은 그림 8에 의해 14.5kts이다. 기상셀  $c_1$

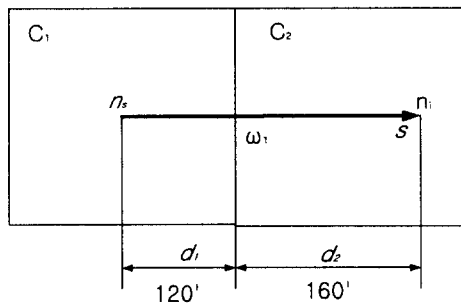


그림 11. 수치 계산 예

에서의 총 선속 감소치는 10.0 kts이고 추정 선속은 8 kts가 되며  $d_1$ 이 120 마일인 경우,  $n_s \sim \omega_1$ 의 항해 시간은 15.0시간이 되며  $\omega_1$ 의 도착 시간  $T_1$ 은 15.0이 된다. 기상셀  $c_2$ 에 대한 항해시간도 같은 요령으로 계산한다.

그 다음, 항구 비용은 예정도착시간에 대한 차이로 계산한다. 그림 11에서  $n_i$ 의 도착시간  $T_i$ 는 25.7시간이 된다. 예정 도착시간을 20시라고 한다면 도착 지연 시간은 5.7시간이 된다. 이에 따른 항구비용은 그림 10에 따라 3.8이 되며 항해비용과 항구비용을 합한 최종 비용은 29.5가 된다.

#### 4.2.3 알고리즘

주어진 네트워크에서 후보 항로의 추출은 깊이 우선탐색 알고리즘을 변형하여 사용한다. 변침점 네트워크  $G^*$ 에서 후보 항로는 시작마디에서 종료마디에 이르는 경로에 의해 구할 수 있다. 따라서 모든 후보 항로를 구하려면, 변침점 네트워크  $G_k$ 의 시작마디로부터 변침점 네트워크  $G_k$ 를 순회하는 깊이 우선 탐색 알고리즘을 적용하면서 각 마디를 방문하되, 그 마디가 도착점마디이면 그때까지의 순회경로로 후보 항로를 만드는 일을 순회가 끝날 때까지 계속하면 된다. 그러므로 모든 후보 항로를 생성하는 알고리즘은 변침점 네트워크  $G_k$ 를 깊이 우선 탐색 순회 알고리즘(Depth-first traversal algorithm)에다 각 마디를 방문할 때마다 도착점마디 여부를 검사하는 절차와 종료마디에 이를 때마다 시작마디에서 종료마디까지의 경로를 하나의 후보 항로로 등록하는 하는 절차를 추가하여 구성할 수 있다. 이를 그림으로 표현하면 그림 12와 같다.

회색으로 표시된 마디는 도착점마디이며 시작마디(0번 마디)에서 출발하여 각 마디를 방문할 때마다 방문한 마디를 스택에 저장하고(Push) 종료마디에 이르면 그때까지 스택에 저장된 마디들로 하나의 후보 항로를 등록한다. 그 다음에는 스택상의 마디를 단계별로 삭제하고(Pop) 다음 마디를 방문하는 과정을 반복한다. 즉, 일반적인 깊이 우선 탐색 알고리즘에다 방문 마디를 스택에 Push하는 과정, 종료마디 여부를 검사하여 종료마디에서 후보 항로를 등록하는 과정, 그리고 스택상의 마디를 Pop하는 과정을 추가한 것이 후보 항로 생성 알고



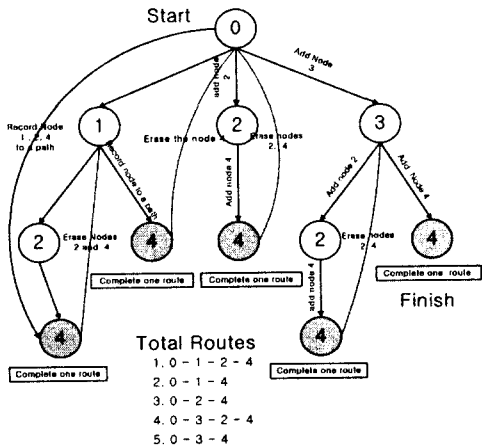


그림 12. 변형된 깊이 우선 탐색 알고리즘

리즘이다.

### 5. 계산 실험

#### 5.1 네트워크 구성 및 자료 입력

##### 1) 변침점 네트워크

최적항로 계획을 시뮬레이션하기 위해 북태평양을 횡단하는 항로를 선택한다. 출발점은 북위 35.35도, 동경 140.56도, 도착점은 북위 33.813도, 서경 121.18도로 임의로 선택한다. 중간점의 간격은 120마일이고 중간점 수는 3으로 한다. 변침점 간격은 600마일로 한다. (부록 1.참조). 이렇게 구성된 변침점 네트워크는 그림 13과 같으며 변침점의 정보는 부록 1의 표 5, 6과 같다.

##### 2) 기상 자료

해류 및 바람의 정보는 5도 단위 기상셀로 구분

표 1. 변침점 구성 자료

출발점	35.35 N, 140.56 E
도착점	33.813 N 121.18 W
변침점 간격	600 마일
중간점 간격	120 마일
중간점수	3

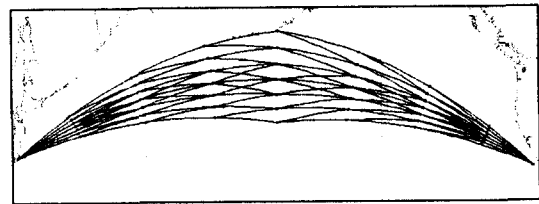


그림 13. 구성된 변침점 네트워크

되어 제공되는 것을 가정하며 북위 15에서 60도, 동경 120도에서 서경 115도까지의 범위에 대해 3~24시간 단위의 기상 패턴을 제공한다. 기상 정보는 항해 시간이 짧은 경우는 3시간 단위로, 항해 시간이 긴 경우에는 24시간 단위로 선속 감소치를 계산한다. 본 연구에서는 표 5와 같은 가상의 기상 정보를 사용한다.

#### 5.2 계산 결과의 검토

##### 1) 도출된 최적항로 정보

표 1에 의해 도출된 최적해는 그림 14와 같다. 총 항해비용은 331.162이고 도착시간에 따른 항구 비용은 12.3이다. 경로의 총 비용은 343.462로 다른 항로에 비해 비용이 최소가 되는 항로이다. 기상의 영향에 따라 대권상을 항해하지 못하고 저위도 해역을 항해해야 하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 도출된 최적항로의 각 변침점 정보 및 항정과 평균 속력을 표 2에 보인다.

##### 2) 대권항로와의 비교

외력이 없는 경우 대권 항로가 가장 짧은 항로이기 때문에 비용도 최소가 되므로 대권항로와 도출된 최적항를 비교하면 얼마나 비용이 절감되었는지를 비교할 수 있다. 대권항로의 정보는 표 3과 같

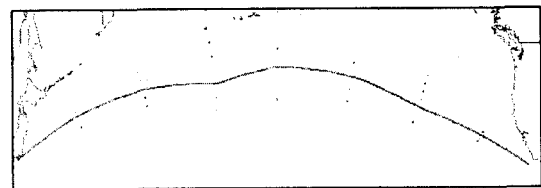


그림 14. 도출된 최적항로

표 2. 도출된 최적항로

변침점번호	위도	경도	침로	항정	평균 속도	항해 시간
1	35.350	140.560				
2	39.716	151.920	64.227	602.468	13.300	45.298
3	41.773	164.891	78.221	604.586	12.500	48.367
4	41.270	178.360	92.845	608.112	14.300	42.525
5	40.491	-169.854	94.977	538.767	16.200	33.257
6	40.810	-156.668	88.181	602.904	14.500	41.580
7	40.589	-143.092	91.225	620.107	13.200	46.978
8	37.461	-130.853	108.146	602.635	15.900	37.902
9	33.813	-121.180	114.802	521.776	14.800	35.255
항해 비용				4701.356	14.197	331.162
항구 비용						12.300
총 비용						343.462

표 3. 대권 항로

변침점번호	위도	경도	침로	항정	평균 속도	항해 시간
1	35.350	140.560				
2	40.225	151.624	60.947	602.297	12.30	48.967
3	43.899	164.170	68.539	602.488	12.50	48.199
4	46.047	177.996	77.648	602.680	12.40	48.603
5	46.433	-167.536	87.800	602.786	13.20	45.666
6	45.008	-153.339	98.154	602.741	14.50	41.568
7	41.941	-140.204	107.786	602.573	12.60	47.823
8	37.532	-128.515	116.049	602.373	13.50	44.620
9	33.813	-121.180	121.864	422.676	13.90	30.408
항해 비용				4640.615	13.041	355.855
항구 비용						14.300
총 비용						370.155

다. 대권항정은 4626.92마일이고 각 변침점 간을 점장항법으로 항해한 경우의 항정은 4640.615마일이 된다. 기상의 영향이 없는 경우에 선박의 속도는 18kts 가 되고 이 경우 항해 시간은 257.812 시간이 된다. (현실적으로 대권상을 할 수 없으므로 4640.615마일이 실제 항해하는 거리가 된다.)

기상의 영향이 있는 경우에 대권 상을 항해하는 경우는 355.855 시간이 된다. 도출된 최적항로를 따라 항해한 경우에는 331.162시간이 소요된다. 이는 대권항정 상의 기상셀에서 선속 저하가 많았기 때문이다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 최적항로 계획에 관한 기존의 연구를 돌아보고 이를 네트워크 모형을 이용하여 해결하였다. 해법으로는 깊이우선 탐색을 변형한 열거해법을 사용하였다. 기존의 연구와는 다르게 최적항로 계획 문제를 항해사의 입장에서 접근하여 보다 실용적인 변침점 네트워크와 최적항로를 도출할 수 있도록 하였다는 것은 주목할 만한 일이다. 네트워크 모형 기반의 최적항로 결정이 다른 연구에 비한 장점은 다음과 같다.

1. Isochrone Method나 동적프로그램에서 생성된 변침점을 항해하는 경우에, 외력의 영향이 전혀 없다고 가정하면, 도출된 최적해는 어떠한 경우에도 대권항로가 될 수 없다. 하지만 네트워크 모형에서는 대권을 기준으로 변침점을 작성하였으므로 대권항로를 최적항로로 결정한다.
2. Isochrone Method는 오직 하나의 최적 항로만을 도출하기 때문에 다른 대안을 검토해볼 여지가 없으나 네트워크 방식은 최적해를 포함한 여러 후보해를 동시에 검토해볼 수 있다

본 연구에 있어 미진한 부분은 항해 비용을 산정함에 있어 내항성 평가나 파랑중 선속 감소, 연료 소모량 결정에 있어 보다 현실적인 국면을 반영하지 못했다는 것이다. 그러한 부분에 관한 연구는 본 연구의 범위를 벗어나는 것이 분명하고 비록 가

상의 자료를 사용하여도 네트워크 모형의 타당성을 위배하지 않는다고는 하나, 현실적인 국면을 반영하지 못하여 실무에 바로 적용하기 힘들다는 점이 본 연구의 단점이다.

### 참 고 문 헌

- 1) Bleik, W.E. Faulkner F.D., 1965, Minimal Time Ship Routing, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 4, pp. 217-221
- 2) Chen, H., 1978, A Stochastic Dynamic Program for minimum Cost Ship Route, Ph.D Thesis, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology
- 3) Faulkner F.D., 1964, Numerical Methods for Determining Optimal Ship Routes, *Journal of the the Institute of Navigation*, 10:4, pp 351-367
- 4) Hagiwara H., 1989, Weather Routing of sail Assisted Motor vessels, Ph.D Thesis, Delft University, Nov.
- 5) Haltiner O. J., hamilton H.D., Armason G., 1962, Minimal Time Ship Routing, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 1 pp 1-8
- 6) Hanssen, G.L., James R.W., 1960, Optimum Ship Routing, *The Institute of Navigation*, Vol.13 No. 3
- 7) Hong K. Lo, 1998, Adaptive ship routing through stochastic ocean currents : General Formulations and Emperical study , *Transpn Res.-A*, Vol.32 No.7 pp 547-561
- 8) Hong K. Lo, Mark R. McCord, 1995, Routing through dynamic ocean currents: General Heuristics and emperical results in the GULF Stream Region, *Transpn Res.-B*, Vol. 28B No.2 pp 109-124
- 9) Klapp A.J., 1979, An Automated Ship Routing, *Journal of Hydronautics*, Vol.13 No. 1 pp. 5-10
- 10) Marks W. Goodman T.R., Pierson W.J. Tick L. J., Vassilopoulos L.A., 1968, An Automated System for Optimum Ship Routing, *Trans. SNAME*, Vol. 76 , 22-55
- 11) Moens W.D., 1980, Weather Routing of Ships, *Trans. Institution of Marine Engineers*, Vol 92. C55
- 12) Papadakis, N.A., 1988, On the Minimal Time Vessel Routing Problem, Ph. D. Thesis, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, The Uni. Of Michigan, Ann Arbor, Mich.
- 13) Perakis A.N., N. Papadakis, 1988, New Models for minimal time Ship Weather Routing, *SNAME Transaction*, Vol. 96
- 14) Perakis A.N., N. Papadakis, 1990, Deterministic minimal time vessel routing, *Operations research*, 38(3), 426-438
- 15) Reynaldo B. Veal, 1994, A Method to Optimize the on-time performance of container ships, *Marine Technology*, 31:1, 52-65
- 16) Zoppoli R., 1972, Minimum Time Routing as an N-Stage Process, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 11, 429-435
- 17) 강맹규, 네트워크와 알고리즘, 박영사, 1991
- 18) 金順甲, 孔吉永, 1997, 선박의 항해중 종합 내항 성능 지표에 관한 연구, *한국항해학회지*, 제21권, 제2호
- 19) 김순갑, 1990, 선박의 파랑중 항해능력 및 추진 성능 평가에 관한 연구, *한국항해학회지*, 제14권 제2호, pp 15-31
- 20) 윤여정, 1987, 지문항해학, 한국해양대학교 출판부, 4th Ed, 단행본
- 21) 윤점동, 1997, 선박조종의 이론과 실무, 한국해양대학교 출판부, 4th Ed, 단행본
- 22) 이상민, 1998, 실시간 기상정보를 이용한 선박의 종합 내항성능 평가에 관한 연구, *한국해양대 해사수송과학과*, 석사논문
- 23) 이충로, 2000, 선박의 종합내항성능 평가정보제공시스템 개발, *한국해양대 해사수송과학과*, 박사논문
- 24) 임상전, 정병만, 이주성, 1985, 유한요소법입문,

동명사

- 25) 정원상, 1996, 수리물리학, 경문사
- 26) 조현기, 2000, 항해중인 벌크선의 실시간 종합 내항성능 평가를 위한 선형 데이터베이스 구축에 관한 연구, 한국해양대 해사수송과학과, 석사논문
- 27) 한국해양대학교 부설 장보고 연구소, 1998, 장보고 연구 제 1권, 단행본
- 28) 한국해양대학교 부설 장보고 연구소, 1999, 장보고 연구 제 2권, 단행본
- 29) 허일 외, 2000, 8세기-9세기 한.중간의 해상활동과 무역에 관한 연구 - 장보고의 해상 활동을 중심으로 - , 한국항해학회지, 제 24권 제 2호

부록 1. 가상의 기상 정보 및 변침점 네트워크

표 4. 기상셀의 기상정보

구분	기상셀 $C_1$				기상셀 $C_2$			
	파도		해류		파도		해류	
시간	파향	파고	유향	유속	파향	파고	유향	유속
0	10	14	10	3.5	20	13	10	1.2
3	20	12	15	3.2	30	10	355	1.5
6	30	12	14	2.5	50	8	350	1.8
9	45	5	20	1.2	80	9	335	2.1
12	48	6	21	1.3	100	7	310	2.2
15	40	7	28	1.5	120	8	300	2.6
18	46	7	30	1.8	152	9	270	2.8
21	46	7	25	1.7	180	10	220	2.8
24	38	8	40	2.0	350	11	210	2.8
27	110	8	20	2.3	340	12	210	2.3
30	130	8	10	1.9	320	14	220	2.5
33	120	2	355	2.5	290	16	240	1.9
36	180	2	270	2.6	310	14	159	1.8
39	230	2	280	3.1	320	18	170	1.4
42	230	6	290	3.6	330	19	185	2.1
45	260	6	300	2.1	340	20	200	3.8
48	330	6	320	1.2	355	14	210	3.6

표 5. 출발점 및 중간점 간의 변침점

중간점		1 간격		2 간격		3 간격		도착점	
52.493	-169.523	49.865	-154.096	45.443	-140.749	39.712	-129.596		
50.493	-169.584	48.347	-154.540	44.437	-141.169	39.182	-129.732		
48.492	-169.642	46.836	-154.974	43.455	-141.608	38.701	-129.917		
46.492	-169.698	45.331	-155.402	42.491	-142.073	38.261	-130.161	33.813	-121.180
44.491	-169.752	43.827	-155.826	41.538	-142.567	37.851	-130.472		
42.491	-169.804	42.321	-156.248	40.589	-143.092	37.461	-130.853		
40.491	-169.854	40.810	-156.668	39.637	-143.649	37.078	-131.308		

표 6. 출발점 및 중간점 간의 변침점

출발점		1 간격		2 간격		3 간격		중간점	
		41.655	150.498	46.930	162.393	50.733	176.476	52.493	-169.523
		41.198	150.911	45.951	163.079	49.199	177.126	50.493	-169.584
		40.720	151.287	44.938	163.672	47.634	177.630	48.492	-169.642
35.350	140.560	40.225	151.624	43.899	164.170	46.047	177.996	46.492	-169.698
		39.716	151.920	42.841	164.576	44.451	178.232	44.491	-169.752
		39.196	152.173	41.773	164.891	42.856	178.350	42.491	-169.804
		38.671	152.384	40.703	165.121	41.270	178.360	40.491	-169.854