

+ 이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

선박의 안전을 위한 최적 항로배치 및 항로폭 결정에 관한 연구⁺

김 환 수*

- A Study On the Safe Width and Alignment of the Navigational Channel -

*Whan-Soo Kim**

〈 목 차 〉	
Abstract	3.4 각 지침상의 항로배치 및 폭에 관한 비교 분석
1. 서론	4. 최적항로폭 결정을 위한 시뮬레이션 및 분석
2. 항로배치 및 폭 결정에 영향을 미치는 요인	4.1 시뮬레이션 방법 및 대상 항로
2.1 선박요인	4.2 시뮬레이션을 위한 수학 모델의 구성
2.2 환경적요인	4.3 시뮬레이션 결과 분석
2.3 인적요인	5. 선박 안전을 위한 최적 항로배치 및 항로폭
2.4 항로표지요인	5.1 항로의 배치
3. 국제 항로설계지침상의 항로배치 기준 및 폭에 관한 비교 분석	5.2 항로의 폭
3.1 PIANC Rule	6. 결론
3.2 미국의 항로설계 지침	참고문헌
3.3 일본의 항로설계 지침	

Abstract

Although the studies carried out in recent years have provided much new information about channel widths and alignment, they are not consistent in their results. In addition, as a result of variations in local condition and type of traffic accommodated, the dimensions of the channel widths vary over a wide range. Therefore, the recommendation made by the maritime engineering organizations over the world, do not offer detailed and decisive optimal design criteria and are all different.

* 정회원, 한국해양대학교 해사안전관리학과 부교수.

It, therefore, was attempted in this paper to draw a decisive guideline on the optimal widths and alignment of the navigational channels, which can be utilized by the port designers at the stage of the planning. The guideline was drawn through the comparison and analysis of the existing guidelines of the U.S.A, Japan and PIANC and simulation experiment. The simulation experiment was carried out using the "Off Line Port and Waterway Design Simulator" to find out the optimal dimensions of the widths of the navigational channels. 90 different simulation runs were conducted at the 3 different scenario channels.

New guidelines, the result of the study, is expected to be used usefully by the Korean port designers when designing the rapidly developing ports in Korea.

1. 서 론

항만을 설계할 때 항만을 이용할 선박의 항해상의 안전과 가장 밀접한 관계를 갖는 부분이 항로의 폭과 배치 부분이다. 지금까지는 항만을 설계할 때 항만 설계자 또는 도선사 등의 경험을 바탕으로 항만의 자연 지형에 맞추어 대략적으로 설계를 하여 온 경우가 많았다. 그러나 선박 건조 기술이 발달함에 따라 선박이 점점 대형화되어 가고 이에 따라 종래의 경험적 방법으로 항만을 설계하는 것은 선박의 안전 운항 측면에서 대단히 위험하게 되었다. 한편 미국, 일본, 캐나다 및 유럽의 선진국에서는 항만 설계에 관한 권고 사항들을 만들어 항로의 폭과 배치 문제를 포함하여 수심 및 선회수역의 크기 등 항만을 개발할 때 직면하는 설계상의 제반 문제들에 대한 일차적인 가이드라인을 제시하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 선박 안전 운항 측면에서의 항만 설계에 관한 연구가 많지 않고, 따라서 항만 설계에 대한 가이드라인이 마련되어 있지 않은 실정이다. 그리고 외국의 설계 지침들도 구체적인 가이드라인 또는 수치의 제시가 미흡할 뿐만 아니라 지침마다 상이한 점이 있어 우리나라의 항만 또는 항로 설계자들이 이를 현실 문제에 적용하는 데는 부족한 점이 없는 실정이다.

이에 본 논문에서는 항로배치 및 항로폭 결정에 영향을 미치는 요인들에 대해 검토한 뒤, 외국 각국의 항만 설계 지침 내용을 비교 분석하고, 항만 설계 시뮬레이션 기법을 이용하여 항로에 대한 안

전 최저폭을 확인해보는 방법을 통해, 우리나라에서 이용할 수 있는 항로배치 및 항로폭에 관한 구체적인 가이드라인을 제시해 보고자 하였다. 시뮬레이션 대상 항로로 15도, 30도 및 40도의 만곡도를 갖는 3개의 가상 항로를 설계하여 실험을 하였으며, 2절에서 항로배치 및 항로폭 결정에 영향을 미치는 요인들에 대해 검토한 뒤, 3절에서 국제 항로설계지침상의 항로배치 및 폭에 관해 비교 분석을 하고, 4절의 시뮬레이션 실험을 거쳐 5절에서 선박안전을 위한 최적 항로배치 및 폭을 도출한 뒤 6절에서 결론을 맺었다.

2. 항로배치 및 폭 결정에 영향을 미치는 요인

출입항 선박의 안전 조선은 항로를 이용하게 될 선박의 크기 및 조종성능과 같은 선박요인, 바람, 조류 및 파도등의 환경적요인, 항로표지의 배치 및 성능과 같은 항로표지요인, 그리고 선장 및 도선사의 경험과 판단력등을 포함하는 인적요인에 의해 좌우된다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 항로의 배치 및 폭 결정에 영향을 미치는 요소들을 선박요인, 인적요인, 환경요인 및 항로표지요인의 네가지 요소로 나누어 볼 수 있으며 이들 네가지 요인의 특성에 대해 분석해 보면 다음과 같다.

2.1 선박요인(Ship Factors)

해상화물 물동량이 증가하고 선사들간의 경쟁

이 치열해 짐에 따라 선주들 사이에 대형 신조선 을 발주하고자 하는 경향이 커져 가고 있으며 아울러 선박 건조 기술의 발달로 인해 조종성능이 낮아 조선이 기존 선박들 보다 어려운 것으로 특징지워 지는 신형 특수선 및 대형선들이 다량 출현하고 있다. 이러한 대형선들의 출현과 함께 이들 대형선들의 사고로 야기될 수 있는 막대한 경제적 환경적 피해에 대한 우려와 관심이 증대됨에 따라 항내에서의 선박의 안전조선 문제에 보다 더 많은 관심이 집중되게 되었으며 따라서 선박의 크기와 조종성능이 항만 및 수로의 설계에 가장 크게 영향을 미치는 요소중 하나로 부각되게 되었다. 한편 선박의 충돌 및 좌초에 관한 통계분석에 의하면 전체 사고의 3분의 1 가량이 사고 선박의 낮은 조종성능에 기인하며 조종성능이 좋았다라면 회피할 수도 있는 경우였다는 것이 보고되고 있다 [1]. 따라서 새롭게 항만을 건설하거나 개발하고자 할 경우 이들 항구를 이용하게 될 선박들의 조종성능 및 조선상의 특성에 관한 내용들이 항로의 설계에 크게 영향을 미치게 되었다.

선박의 조종성능이 항로의 설계에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나라는 사실을 고려하여 Atkins가 선박 조종성능의 감소가 제한 수로에서의 선박의 안전에 미치는 영향을 실험한 바 있으며 그 결과는 도선사가 조종성능의 감소에 대처하여 선박을 안전하게 조선한다는 것이 매우 어렵다는 것을 보여 주고 있다[2]. 같은 실험에서 조종성능이 낮은 선박이 수로를 항해할 때에는 직선 구역 및 만곡 부분 모두에서 항적의 변화 폭이 더 커진다는 사실이 실험적으로 확인되었다. 이와 같이 조종성능이 낮은 선박이 항해하는 수로일수록 선박의 안전통항을 위해 수로의 폭이 더 넓을 것이 요구된다는 점을 감안할 때 선박 조종성능으로 대표되는 선박요인(Ship Factor)이 항로의 설계에 있어서 가장 중요한 요인 중의 하나로 고려되어야만 할 것이다.

2.2 환경적요인(Environmental Factors)

바람 조류 및 파도등과 같은 외부 환경적인 영

향은 선박이 제 항로로 가기 위해서는 drift angle을 가지고 항해하도록 선체에 힘을 미치며 따라서 선박의 항적폭을 외력의 영향이 없는 경우 보다 훨씬 넓게 만드는 직접적인 요인으로 작용하므로 항로의 설계에 반드시 고려되어야 할 중요한 요소 중의 하나이다. National Maritime Institute (NMI-영국)의 도선사들을 대상으로한 설문 조사를 통한 보고서는 이들 세가지의 환경적요인들 중 바람의 영향이 항만 및 제한 수로에서의 선박의 항해에 가장 심각한 영향을 미치는 것이라고 지적하고 있다.

강한 바람의 영향 아래에서 제 항로를 유지하기 위해서는 선체의 모양 및 바람의 세기와 방향을 고려하여 drift angle을 감안한 뒤 침로를 수정하여 항해하여야 하며 아울러 일정한 타각을 계속적으로 유지해 주어야 한다. 이렇게 바람의 영향하에서 drift angle을 유지하기 위하여 써야 될 타각의 크기가 크면 클수록 침로를 바꾸거나 선회를 하기 위하여 쓸 수 있는 타의 여유가 줄어들며 따라서 선박의 안전성은 심각하게 감소한다. 이러한 바람의 영향은 바람을 받는 선체의 모양, 선속에 대비한 풍속 그리고 상대적인 풍향에 좌우되게 된다. 정황 또는 정황 후미쪽으로 부터의 바람이, 특히 풍속이 선속의 10 배를 넘는 경우에, 선박의 조종성능에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

저속으로 항해하는 선박에 조류와 바람이 함께 영향을 미치는 구역에서는 항로 폭을 결정하는데 특별한 고려를 하여야 한다. 항만 및 수로의 입구 부근에서 조류의 속도와 방향이 불규칙적으로 변하거나 그에 대한 정보가 불충분 할 경우에도 안전 항해에 위협이 따른다. 따라서 수로를 설계하거나 항만 입구에 방파제를 건설할 경우에는 이러한 조류의 영향이 최소가 될 수 있도록 설계를 해야만 한다.

2.3 인적요인(Human Factors)

선박 운항의 안전성은 선박 고유의 조종특성과 환경적요인 뿐만 아니라 선박 운항요원의 경험과 기술에도 좌우된다. 그러나 실제 충돌 및 좌초 사

고의 몇 퍼센트가 인간의 실수나 판단 착오에 의한 것인지 그리고 어느 정도가 선박 자체의 고유한 조종성능에 기인하는 것인지 가려낸다는 것은 지극히 어려운 일 중의 하나이다. 수로 및 항내에서의 선박 사고는 선장 또는 도선사가 조류 및 바람의 영향을 잘못 판단하여 제때에 침로를 수정하지 못하여 일어날 수도 있으나 선박 자체의 조종성능이 나쁨으로 인해서 발생할 수도 있는 것이다. 또한 선박운항자의 상황 판단은 외부로 부터의 정보를 바탕으로 하여 경험과 기술에 의해 이루어지게 되므로 도선사의 선박조종 능력(Piloted Controllability)는 항로표지 및 항해기기 들로부터 얻을 수 있는 여러가지 정보들의 정확도와 신뢰성과도 관련이 있다. 선박의 조종성능이 인적요인 즉 인간 능력의 한계에 의해 제한을 받을 수 있다는 것이 밝혀진 것은 근래의 일이며 이전까지는 인간의 능력은 훈련에 의해 어떤 어려운 상황에서도 선박을 조종할 수 있을 정도로 그 기능이 부단히 향상될 수 있다고 생각되어져 왔다. 선박의 조종과 관련한 인간 능력의 한계는 다음과 같은 점들을 수가 있다고 PIANC(Permanent International Association of Navigation Congresses)의 보고서는 지적하고 있다[3];

(1) 인간은 장시간 후의 선위와 침로의 변화를 예측할 수 없다.

(2) 인간은 선위 및 회두 속도의 작은 변화를 감지할 수 없다.

(3) 선위 변화의 어느 정도가 타각에 의해서 그리고 어느 정도가 바람 조류 파랑등 외부 환경요인에 의해서 발생하였는지를 구별할 수 있는 능력이 인간에게는 없기 때문에, 인간은 선박의 위치를 수정하기 위하여 어느 정도의 타각을 써야 할 것인지를 정확하게 결정할 수 있는 능력이 없다.

2.4 항로표지요인(Aids to Navigation Factors)

Atkins에 의해 실시된 수로를 항해하는 선박의 안전과 부표의 관계에 관한 실험에 의하면[2], 일정 간격으로 설치된 부표들 사이에 추가로 부표를 설치하였을 때가 그러지 않았을 때보다 통항 선박

의 항적폭을 줄이며 아울러 항적이 평균적으로 수로의 중심선 쪽으로 이동하는 경향이 있다는 것을 보여 주고 있다. 부표에 설치된 등화의 등질이 선박이 수로를 야간 항해하는데 미치는 영향에 대해 Smith등이 실시한 연구는 주기가 짧은 섬광등이 주기가 긴 섬광등에 비해 수로에서의 안전한 침로 변경에 더 효과적이라는 것을 보여 주고 있다[4]. 이들 실험 및 연구 결과들은 수로에서든 선회수역(turning basin)에서든 선박이 안전한 조선 구역 내에 머무를 수 있게 하는데는 항로 표지의 배치 유무와 배치의 적합성 그리고 이들 항로 표지들의 정확도 및 신뢰성이 크게 영향을 미친다는 것을 명확하게 보여주고 있다. 이들은 물론 이들 항로 표지들로부터 수집된 정보에 대해 반응하는 인적요인과의 밀접한 관계를 가진다. 이와 같은 이유로 정도가 높고 성능이 좋은 항로 표지를 충분히 설치하여 항해사 또는 도선사에게 더 좋은 항해 정보를 제공함으로써 적절한 안전도를 유지하면서 수로의 폭을 어느 정도 줄일 수도 있다.

3. 국제 항로설계지침상의 항로배치 기준 및 폭에 관한 비교 분석

3.1 PIANC Rule

유럽 지역을 중심으로 하여 전세계적으로 널리 사용되고 있는 항로설계 지침인 PIANC Rule은 [3], 주로 유럽 지역의 항만 및 항로 설계 전문가, 선체 운동에 관한 연구자 및 항해전문가들로 구성된 PIANC에 의해 1978년에 구성된 ICORELS의 제4연구소위원회가 2년간의 연구를 거쳐 1980년도에 발표한, 항로의 수심, 항로의 배치, 항로의 폭, 그리고 선회수역의 크기 및 배치에 관한 설계 지침이다. 전체 내용중 항로의 배치 및 폭에 관한 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

3.1.1 항로의 배치

(1) 항로를 설계할 때에는 해당 해역의 바람, 조류, 파도등을 고려한 선체운동역학 및 육상의 항로 표지 및 통항하는 선박에 탑재되어 있는 항해장비

등을 성능들을 고려하여 그 배치를 결정하여야 한다.

(2) 선박의 조종성능은 횡방향의 조류나 바람에 크게 영향을 받기 때문에, 적어도 항해상의 위험이 예견되는 곳에서는, 항로를 이용할 대형 선박들의 최저 속도를 고려하여, 선박의 편각이 10도 내지 15도를 넘지 않도록 하는 것이 바람직하다. 조류는 가급적 선수 방향에서 반도록 하는 것이 좋다.

(3) 항로상에서는 변침이 매우 위험한 요소의 하나이므로 가급적 직선 항로가 되도록 설계하는 것이 바람직하다. 조류의 자연스러운 흐름에 따르면서 긴 간격을 두고 소각도 변침을 수회 하는 것은, 신뢰성 있는 항로표지가 선박의 위치 확인 등을 확실하게 보장할 수 있는 경우라면, 허용될 수 있다.

(4) 대각도 변침이 불가피한 경우에는 선회 중심점을 중심으로 방사형의 조선이 가능하도록 항로의 만곡부가 설계되어야 한다. 따라서 작은 간격으로 다수의 커브를 두는 것보다는 하나의 단일 커브가 더 낫다. 그러나 방사형 조선이 가능한 단일 커브의 수로를 설계하는 경우에는 큰 시간의 소요 없이 위치 확인이 가능하도록 항로의 만곡부에 양질의 항로표지가 설치되도록 하여야만 한다.

(5) 항로의 만곡부는 그 반경이 최소한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 5배는 되어야 하며 가능하면 10배 이상이 좋다.

(6) 만곡부들 사이의 직선 통항로는 가급적이면 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 10배의 길이를 갖도록 하여야 한다.

(7) 교량등이 있거나 하여 항로가 좁아지는 부분의 경우에는 최소한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 다섯배의 길이를 갖는 직선 통항로를 경계 부분 전후에 두어야 하며, 그 구간에는 특히 양질의 항로표지를 설치해 두어야 한다. 그리고 항로의 폭 부분에서 정의될 최소 항로폭은 반드시 지켜져야 한다.

(8) 수로나 항내에서 선박 사고나 기관 고장이 발생할 수 있다. 그러한 경우 해상교통이 완전히 마비되거나 교통 흐름 속도가 현저히 떨어질 수 있다. 항로마다 각 선박의 종류에 따라 해당 선박

이 정지 또는 후진하거나 수로를 벗어날 수 없는 소위 “돌아 갈 수 없는 지점”들이 있다. 따라서 다음과 같은 내용이 권고된다.

- 특히 긴 수로나 복잡한 항로의 경우 항해 불능 선박이 가급적 빠른 시간 내에 항로를 벗어날 수 있도록 하는 여유 수역을 적절히 마련해 둘 필요가 있다.

- 대형선에 대하여서는 돌아갈 수 없는 지점으로부터 진입항까지의 거리를 가급적 짧게 해야 한다.

3.1.2 항로의 폭

(1) 항로의 폭이란 확보된 최저 수심상의 수로의 최소 너비를 말한다.

(2) 편도 항로의 항로폭은 다음으로부터 결정된다.

- ① 항로를 이용할 최대 선박의 선폭.
- ② 선박의 실제 위치와 항해사가 가능한 모든 정보, 특히 항로표지들을 이용하여 구한 선위와의 차 중 횡방향 성분의 크기.
- ③ 항로로부터의 이탈을 확인한 후로부터 원항로로 돌아가기 위한 수정 동작이 취해지기 시작한 시점까지 발생하는 추가적인 이탈 거리.
- ④ 횡방향의 조류를 받으며 편각을 가지고 항해를 해야 할 경우 항로폭에 다음 값을 추가하여야 한다.
- $L/2 \sin \beta$ (L :선체의 길이, $\tan \beta$ = 조류속도의 횡방향 성분/선속)
횡방향으로 부는 바람도 유사하게 고려되어야 한다.
- ⑤ 좌우현으로 선폭의 $1/2$ 보다 작지 아니한 안전 여유 폭.

(3) 따라서 항로의 최소폭은 기본적으로 다음에 의해 결정된다.

- ① 항로를 이용할 가장 큰 선박의 크기와 조종 성능
- ② 특정한 항행환경에 맞게 적절히 설비되어야 하는 여러 가지 항로표지 및 항해기기의 특성

- ③ 항로표지의 정확도 및 신뢰성
- ④ 허용 통항 속도 뿐 아니라 교통량 및 교통 특성
- ⑤ 스웰 또는 바람에의 노출 정도 등과 같은 해상 및 기상 상태. 특히 조류의 성질 및 세기, 그 중에서도 항로의 횡방향 성분에 대한 것이 중요한 요소이다.

⑥ 항로폭은 특히 선장과 도선사의 경험과 같은 인간요인의 영향을 크게 받는다.

(4) 현재의 기술 수준으로는 진입 수로의 폭을 결정하는데 영향을 미치는 상기의 여러 가지 요소들이 부분적으로 평가될 수 있을 뿐 이들의 영향에 대한 종합적이고 정확한 계산을 할 수는 없다. 여러 가지 편도 항로에 대한 검토를 해본 결과 지역적인 조건 및 환경의 차이에 따라 항로의 최소폭은 가장 큰 출입 선박의 폭의 4배에서 8배 그리고 크게는 10배에까지 이를 수 있다는 것이 확인되었다. 현재 할 수 있는 유일한 일반적 권고는 항로폭이 가장 큰 선박폭의 5배보다 작아서는 안된다는 것이다. 특히 횡방향으로 조류가 흐르는 등 더 열악한 환경 하에서는 항로폭이 이에 따라 더 넓어져야 한다.

(5) 만곡부에서는 항로의 폭이 다음에 따라 증가되어야 한다.

- 선박의 길이에 따르는 항로의 여유폭 $L^2/8R$ (L:선박의 길이 R:만곡부의 반경)
- 조선상의 어려움, 특히 선박은 그 특성상 조선명령에 신속히 응답하지 않으며 따라서 도선사가 선박의 운동을 예측해가면서 조선해야 하는 어려움을 고려한 추가 여유폭.

서로 다른 폭을 갖는 항로 구간들의 경우 그 끝단들은 직선 구간으로 연결되어야 한다. 그리고 항로폭의 변경은 전진 거리 100m당 10m를 초과해서는 안된다.

(6) 왕복 통항항로의 경우 두 통항 선박 사이의 간격이 최소한 큰 선박의 선폭의 2배가 되면 위험하지 않다. 그러나 항과시의 조종성 제한도 고려해야 한다. 따라서 (4)에서 권고된 편도 항로의 항로폭에 가장 큰 선박의 선폭의 3 내지 5배를 추가해 주어야 하며, 조류나 바람에 의한 drifting 효과

에 의한 값(가장 큰 선박의 길이×sine 최대 편각 β)을 더해 주어야 한다.

3.2 미국의 항로설계 지침

미국의 경우 항로를 설계할 때 미육군공병대에서 1983년에 발표한 항로 설계를 위한 지침을 이용하고 있다. 이 항로설계 지침[5]은 항로의 수심, 항로의 폭과 배치, 선회수역의 크기 및 수심에 관한 가이드라인을 제공하고 있으며 그 중 항로의 배치 및 폭에 관한 내용을 요약하면 다음과 같다.

3.2.1 항로의 배치

초기 건설시 및 향후 관리시 준설을 최소화하기 위해서는 항로의 배치가 수로의 깊은 수심을 따라서 될 수 있도록 항로를 설계하여야 한다. 비록 항로상의 만곡부의 수는 가능한 한 줄일 수 있도록 해야 하지만 직선 구간들 사이에 작은 만곡부를 두는 것은 range marker를 적절히 세워 두면 위치 확인이 용이하게 될 수 있고 정확한 조선을 가능하게 해 줄 수 있기 때문에 허용될 수 있다.

그리고 만곡부간의 직진 구간은 적어도 최대 선박의 선폭의 5배는 되어야 한다. 완만한 만곡부가 불가능한 곳에서는 만곡부를 ACM(Apex or Cutoff Method) 방식으로 절단하여 확장하는 것을 고려하여야 한다.

방파제나 호안 또는 파도 흡수장치와 같은 구조물을 적절히 설치하여 항로의 배치 및 폭을 조절할 수도 있다. 만일 퇴적물의 이동이나 침전을 조절할 구조물이 설치되지 않는다면 모래톱이나 진흙톱을 가로지르는 항로 배치는 피해야 한다.

3.2.2 항로의 폭

(1) 일반 사항

항로폭은 당해 항로를 이용하게 될 선박이 안전하고 효율적으로 운항할 수 있도록 설계되어야 한다. 필요한 최소 항로폭은 선박의 크기와 조종성능, 수로의 형태와 배치, 교통 밀도, 해당 해역의 바람, 파도, 조류 및 시정, 항로표지의 성능과 설치 간격, 그리고 편도 또는 왕복통항 항로 여부에 따

라 결정된다.

(2) 고려 사항

항로폭은 선박의 조선통항폭, 통항 선박 사이의 간격, 그리고 특히 제한된 수로의 경우 안벽과의 여유 거리를 제공할 수 있는 폭이 되어야 한다. 항로의 입구 또는 만곡부에는 여유폭을 추가로 주어야 한다.

(3) 조선통항폭(Manoeuvring Lane)

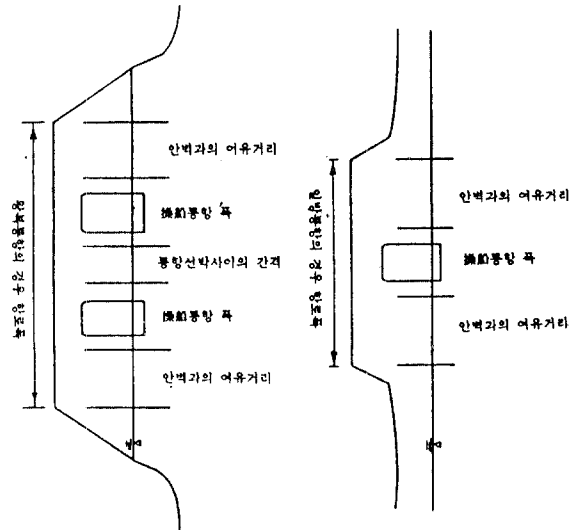
최소 항로폭을 결정하는 첫번째 단계는 선박의 조선통항폭을 결정하는 것이다. 조선통항폭은 선박이 안벽과의 여유거리 구간을 침범하거나 다른 선박에 위험을 줄 정도로 타선박의 항로를 침범함이 없이 직진 항로로부터 벗어날 수 있는 폭이다. <그림 3-1>과 <표 3-1>에 항로폭에 대한 상세한 내용이 나와 있다. 유능한 도선사가 조선하는 조종성능이 우수한 선박의 경우 조선통항대의 최소 폭은 선폭의 160%이다. 이 값은 선박이 편각을 가지고 항해하게 만드는 횡방향의 조류, 바람, 그리고 파도의 영향이 없는 항로에 적용된다. 조종 성능이 좋지 않은 선박이 대상 선박인 경우, 같은 조건하에서 조선통항폭은 선폭의 200%가 된다. 대형선 통항이 그리 빈번하지 않은 항로의 경우에는 작은 선박은 왕복통항, 대형선은 일방통항을 할 수 있도록 설계할 수가 있다.

항로의 조선통항폭을 결정할 때 횡방향의 조류 또는 바람의 영향이 있는지, 그리고 기상 상태가 시정이나 타선박의 위치 파악에 영향을 미치는지에 대한 판단이 요구된다. 선박 통항량이 매우 많은 항로나 위험화물이 운송되는 항로의 경우에는 추가 여유폭을 주어야만 한다.

(4) 통항 선박 사이의 간격

양방통항 항로의 경우 교항 선박 상호간의 간섭이나 충돌 위험을 피하기 위해 조선통항대 사이에 여유 간격을 두어야 한다. 최소한의 통항 선박 사이의 간격은 횡방향의 조류 또는 바람의 영향이 없다고 가정할 때 통상 선폭의 80%이다. 횡방향의 조류 또는 바람의 영향이 있는 경우에는 조선통항대 속에 여유 폭이 가산되게 된다. 그러나 이들 횡방향 힘의 영향이 매우 큰 경우에는 통항 선박 사이의 간격에 안전 거리를 더 추가해 주어야 할 필요가 있을 수 있다.

<그림 3-1> 항로폭



<표 3-1> 항로폭에 대한 일반 기준

위 치	선폭의 100분율로 표시한 최소한의 항로폭			
	선박 조종 성능			횡방향의 조류, 바람이 있는 경우 추가폭
	대우양호	양호	불량	
조선통항폭, 직선항로	160	180	200	판 단
만곡부, 26도 만곡	325	370	415	판 단
만곡부, 40도 만곡	385	440	490	판 단
통항선박사이의 간격	80	80	80	100, 그리고 100 FEET 보다 작지 않을 것
안벽과의 여유거리	60	60	60	150

* 판단은 각 사업별로 지역적 특성에 따라 이루어짐.

(5) 안벽과의 여유 거리

안벽과의 여유거리는 인접한 조선통항대의 끝단과 해저의 경사면 시작 지점 사이의 수평거리를 말한다. 횡방향의 조류 또는 바람의 영향이 없는 항로에서 조종성능이 좋은 선박이 통항하는 경우 안벽과의 여유거리는 선폭의 60%가 되어야 한다. 강한 횡방향의 조류 또는 바람이 있는 경우 또는 안벽이 바위 등과 같은 단단한 물질로 이루어져 있는 경우에는 지역적 특성들을 고려하여 안벽과의 여유 거리를 선폭의 150% 이상으로 늘여야 한다.

(6) 부표와의 여유 거리

항로를 표시하기 위한 부표는 조류 및 수심의 변화 그리고 파랑에 의해 그 위치가 변화한다. 또한 부표의 위치는 정확성에 한계가 있다. 항로폭을 결정할 때에 부표의 이동과 관련하여 여유 폭을 줄 것인가 하는 것은 선택적인 사항이다. 부표와의 여유 거리는 지역적인 상황에 따라 판단할 사항이며 range marker를 사용하는 항로의 경우에는 필요치 않다.

(7) 항로 입구의 폭

항로 입구에서는 선박들이 강하고 변화가 많은 조류, 강한 파도, 바람, 안개 그리고 기타 항해에 어려움을 주는 여러 가지 요소들에 의해 영향을 받아 항해상에 어려움을 겪게되는 것이 보통이다. 안전 항해를 확보하기 위해서는 일반적으로 항로 입구에서의 항로폭이 항로 내측의 항로폭보다 더 넓도록 하여야 한다.

(8) 항로 만곡부에서의 항해

선박이 만곡부를 항해할 때의 항적폭은 직선 구간 항해시의 항적폭보다 더 크다. 만곡부에서의 항적폭은 만곡도, 선박의 길이와 폭, 그리고 속도와 조종 성능에 좌우된다. 만곡부를 따라 변침해가며 항해하는 선박의 경우에도 조류, 바람, 그리고 파도의 영향을 받으며, 이 경우 선박의 진행 방향이 변침에 따라 각각 다른 힘을 받으며 항해하게 된다. 통상적으로 만곡부에서의 항해는 직선 항로에서의 경우보다 훨씬 더 어렵다.

(9) 만곡부에서의 항로폭

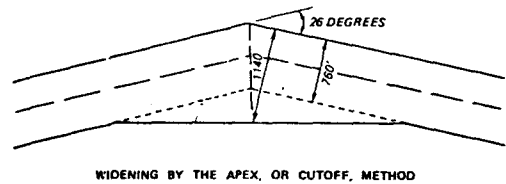
만곡부를 항해하는 선박의 항적폭은 직선 구간을 항해하는 경우보다 그 폭이 더 크기 때문에 만곡부에서는 항로폭을 더 넓게 해야한다. 만곡부에서 요구되는 추가 항로폭에 대한 정보는 매우 적으며, 1940년도의 파나마 운하의 선박 통항에 관한 연구시에 검토된 내용이 참고될 수 있을 것이다. 그 값은 <표 3-1>에 제시된 것과 같으며, 26도 및 40도의 각도를 갖는 만곡부에 대한 항로폭을 제시하고 있다. 만곡부의 추가 항로폭은 선박의 길이와 만곡부의 반지름의 크기와도 관계가 있기 때문에 이러한 값에 대한 고려가 없는 이 연구 결과값은 어디까지나 일반적인 값에 불과하다고

할 수 있다. 일반적으로 항로의 만곡부는 최대 통항 선박의 선장의 5배의 반경을 가져야 하며 가능하면 10배 이상이 안전하다.

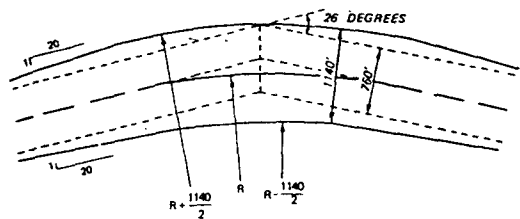
(10) 만곡부에서의 항로폭을 증가시키는 방법

만곡부의 항로폭을 증가시키는 방법은 여러 가지가 있다. 가장 보편적인 방법은 ACM 방법이라고 알려진 것으로 <그림 3-2>에 이는 것처럼 만곡부의 안쪽 꼭지점 부분을 절단하여 삼각형 형태로 항로폭을 확대하는 것이다. 이렇게 확장하는 경우 조류를 나쁘게 하는 경우가 발생할 수도 있다. 다른 한 방법은 PBM(Parallel Banks Method) 방법으로, 만곡부의 항로폭을 일률적으로 넓히고 만곡부 앞뒤의 직선 구간과의 연결 부분까지는 항로폭을 점진적으로 줄여서 직선 구간 항로와 연결되도록 하는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 준설 면적이 넓게되는 특징이 있고, 수심 등에 있어서 심하게 제한된 수로나 조류가 위험한 곳에서 유리한 방법이다.

<그림 3-2> 만곡부에서의 항로폭 증가 방법



WIDENING BY THE APEX, OR CUTOFF, METHOD



WIDENING BY THE PARALLEL BANKS METHOD

3.3 일본의 항로설계 지침

일본의 항로 설계 지침[6]은 크게 항로와 정박지 두 부분으로 나누어져 있으며 항로편에서는 항로 만곡부의 배치, 항로의 폭 및 수심을 다루고 있

고, 정박지편에서는 정박지의 면적, 돌계와 돌계 사이의 박지의 폭, 선회수역의 크기, 정박지의 수심에 대해 다루고 있다. 그 중 항로의 배치와 폭에 대한 내용을 요약하면 다음과 같다.

3.3.1 항로의 배치

(1) 항로를 계획할 때에는 안전한 항행, 조선의 용이함, 지형, 기상, 해상조건, 및 관련시설들과의 조화를 고려해서 계획하여야 한다. 다음과 같은 조건이 만족 되었을 경우 양호한 항로라고 할 수 있다.

- ① 만곡부가 있을 경우 만곡도가 적을 것.
- ② 폭이 넓고, 수심이 충분 할 것
- ③ 바람, 조류, 그리고 그 밖의 기상 및 해상조건이 양호할 것.
- ④ 항로표지 및 신호설비 등이 잘 정비되어 있을 것.

(2) 만곡부에 있어서의 항로 중심선의 교각은 대체로 30도를 넘지않는 것이 바람직하다. 30도를 초과하는 경우에는 항로 만곡부의 중심선의 곡률반경이 대상 선박의 선체 길이의 4배 이상이어야 하며, 동시에 항로폭이 적정 이상 확보되어야 한다. 단 항로표지 및 신호 등에 의하여 안전하고 원활한 조선이 가능하도록 되어 있는 경우에는 그렇지 않다.

3.3.2 항로의 폭

항로의 폭은 다음과 같이 정한다.

(1) 일반항로: 왕복항로에 있어서의 항로의 길이 및 통항상황에 따라 다음 <표 3-2>와 같이 정해진다.

(2) 통항량이 현저하게 많은 항로 등: 통항량이 현저하게 많은 항로, 항로를 횡단하는 선박의 항행이 예상되는 항로, 초대형선을 대상으로 하는 항로 등에 있어서는 상기 표의 폭에 이용 실태를 감안하여 여유를 더 주어야 한다.

(3) 어선 또는 총톤수 500톤 미만의 선박을 대상으로 하는 항로 : 이용 실태에 따라 적절한 폭으로 한다.

<표 3-2> 항로의 폭

(L은 대상선박의 선장)

항로의 길이	통 항 상 황	선폭
비교적 거리 가 긴 항로	대상선박들이 빈번하게 서로 만날 경우	2L
	상기 이외의 경우	1.5L
상기 이외의 항로	대상선박들이 빈번하게 서로 만날 경우	1.5L
	상기 이외의 경우	L

3.4 각 지침상의 항로배치 및 폭에 관한 비교 분석

항로의 배치에 관하여서는 유럽의 PIANC Rule 이 가장 구체적인 가이드라인을 제시하고 있다. 반면 미국과 일본의 항로설계지침에서는 매우 일반적인 사항만을 언급하고 있다. 이는 항로의 배치가 지형적 특성과 환경적 특성에 따라 다양하게 바뀔 수 있기 때문에 이에 관한 구체적인 Rule을 정립하기 어렵기 때문이라고 판단된다. 세 지침 모두에서 항로의 만곡부는 항행상의 위험이 수반되므로 가급적 만곡부를 줄이거나 불가피한 경우 만곡부의 항로폭을 늘리도록 권고하고 있다. 구체적인 치수는 PIANC Rule에 가장 잘 명시되어 있다. 즉 항로의 만곡부는 그 반경이 최소한 최대 통항 선박의 선장의 5배 이상, 가능하면 10배 이상이 되도록 하고 있고 만곡부들 사이의 직선 통항로는 가급적 가장 큰 선박의 선장의 10배의 길이를 갖도록 권고하고 있는 것 등이다. 한편, 일본의 항로설계지침에서는 만곡부의 만곡도가 30도를 넘지 않는 것이 바람직하며, 30도를 넘는 경우 만곡부의 반경이 최대 통항 선박의 선장의 4배 이상이어야 한다고 정하고 있으며, 만곡부의 반경에 있어 PIANC Rule과 1B(B:선폭)의 차가 난다. 미국의 지침의 경우 항로 만곡부의 반경을 PIANC Rule에서와 똑같이 정하고 있으며, 만곡부간의 직선 구간은 적어도 최대 선박의 선폭의 5배는 되어야 한다고 정하고 있다. 이 값은 PIANC Rule에서 정한

10배와는 큰 차이가 나는 값이다.

그리고 항로의 폭에 관하여서도 PIANC Rule이 가장 구체적으로 가이드라인을 제시하고 있음을 알 수 있다. PIANC Rule에서는 지형 및 환경 조건의 차이에 따라 달라질 수 있으나 항로폭은 일방 통항 항로의 경우 최소한 가장 큰 선박의 선폭의 5배가 되어야 한다고 정하고 횡조류 등이 있는 열악한 조건하에서는 추가폭이 요구된다고 권고하고 있다. 그리고 만곡부에서는 항로의 추가 여유폭으로 $L^2/8B$ 이 요구된다고 권고하고 있다. 왕복 통항항로의 경우 두 통항 선박사이의 간격이 최대 통항 선박의 선폭의 2배가 되면 위험하지 아니하므로 최대 선박 선폭의 8 ~ 10배가 되어야 하며 여기에 조류나 바람에 의한 drifting 효과를 추가해 주어야 한다고 정하고 있다.

미국의 항로설계지침에서는 항로폭 구성 요소를 조선통항폭, 통항 선박 사이의 간격, 안벽과의 여유 거리로 구분한 뒤 각각의 최소값을 정해두고 있다. 직선항로의 경우 조선통항폭은 조종성능에 따라 1.6B ~ 2B 사이의 값이 되어야 하며(조류, 바람, 파도의 영향이 없는 경우), 통항 선박 사이의 간격은 0.8B(횡방향 바람이나 조류의 영향이 없는 경우), 안벽과의 여유 거리는 0.6B(횡방향의 바람이나 조류의 영향이 없는 경우) 이상이어야 한다고 규정하고 있다. 만곡부에서는 항로폭을 상황에 맞추어 증대시켜 주어야 한다고 정하고 있으며, 사례로서 파나마 운하의 항로 설계 연구 결과를 예시하고 있다. 그리고 항로 만곡부는 최대 통항 선박의 선장의 5배, 가능하면 10배 이상의 반경을 갖도록 설계하여야 한다고 정하고 있다. 만곡부의 만곡도에 대한 치수는 PIANC Rule의 항로 배치편의 값과 동일하게 정해져 있다.

일본의 항로설계지침에서는 왕복통항항로의 항로폭을 긴 항로의 경우와 그렇지 않은 항로의 경우로 나누어서 정하고 있으며, 상황에 따라 선체 길이의 1배에서 2배까지로 한다고 규정하고 있다.

세 지침 전체를 비교해 볼 때 유럽과 미국의 지침은 최소 안전 항로폭을 선폭을 기준으로 하여 정하고 있는 반면 일본의 지침은 선체의 길이를 기준으로 하고 있는 점이 기본적으로 다르다. 선

체의 길이는 선형에 따라 선폭의 약 6 ~ 7배가 된다고 볼 때 세 지침에서 정하고 있는 최적 항로폭은 양방 통항 항로를 기준으로 해 볼 경우, PIANC Rule의 경우 8B ~ 10B, 미국의 지침의 경우 5.2B ~ 6B, 일본의 지침의 경우 6B ~ 14B 사이로 그 값의 차이가 상당히 크다는 것을 알 수 있다. PIANC Rule과 미국의 지침은 조류 및 바람의 영향이 없는 경우의 값이고 일본의 경우는 감안된 값이라고 보면, 일본의 경우는 PIANC Rule과 대개 비슷한 값을 제안하고 있다고 볼 수 있으나, PIANC Rule과 미국의 지침과는 3B이상의 차이가 나고, 어느 지침도 조류나 바람의 영향이 있을 때에는 항로폭을 적절히 증가시켜 주어야 한다고 막연히 제시하고 있을 뿐이라는 점에서, 최적(최소 안전) 항로폭에 대한 보다 더 구체적인 값의 제시가 필요하다고 할 수 있다.

4. 최적 항로폭 결정을 위한 시뮬레이션 및 분석

4.1 시뮬레이션 방법 및 실험 항로 설계

최소 항로폭에 관한 각 지침별 권고 내용에 차이가 있으므로 본 장에서는 항로설계 시뮬레이션 실험을 통해 항로폭의 안전 최소값을 구해보기로 한다. 실험에는 영국의 Maritime Dynamics사에 의해 개발된 Off Line Port and Waterway Design Simulator를 사용하였다. 본 시뮬레이터는 실험 대상 항로상에 대상 선박의 운동모델을 입력한 뒤, 휴먼 알고리즘에 의해 주어진 환경 조건하에서 대상 선박의 모델이 항로를 통항하도록 하여 선박의 궤적을 확인할 수 있는 시스템으로서, 선박 궤적의 분석을 통해 특정한 환경 조건하에서의 선박의 안전 항해 여부를 검증할 수 있는 실험 장비이다.

항로폭에는 전술한 여러 요소들 가운데 인적요인 및 항로표지요인을 제외하고는 선박 자체의 조종성능과 바람 및 조류가 가장 큰 영향을 미치므로 이들 변수들을 고려한 최적폭을 찾을 수 있도록 실험 설계를 하여야 한다. 따라서 대상 선박을

조종성능이 양호한 선박, 보통인 선박, 나쁜 선박으로 나누어 실험을 하였다. 조종 성능이 양호한 선박으로는 35,000GRT의 Bulk Carrier를, 보통인 선박으로는 50,000GRT의 Container선을, 나쁜 선박으로는 170,000GRT의 광석선을 선택하였다. 그리고 환경변수인 바람과 조류의 변화에 대한 항로폭의 변화를 확인하기 위해서는 바람과 조류의 종류별로 항로폭의 변화를 확인하여야 하겠으나, 조류의 경우 항로별로 다양한 방향의 서로 다른 값을 갖는 조류들이 있고 이들 모든 조류에 대한 실험을 실시하는 것은 현실적으로 불가능에 가까우므로 조류의 영향은 따로 분석하기로 하고 바람만 고려하여 실험을 하였다. 바람은 선박 진행 방향에 직각으로 부는 바람이 가장 큰 영향을 미치므로 정횡풍만을 입력하였다. 그리고 바람의 속도는 최악의 경우를 가산하여 25 노트를 입력하여 실험하였다.

실험 대상 항로로는 폭 700 미터 길이 3000 미터의 직선 구간과, 같은 폭을 갖는 1500미터의 만곡부 이후의 구간으로 이루어지는 가상의 항로를 설정하여 실험을 실시하였다. 만곡도에 따라 만곡부의 항로폭이 달라지므로 만곡도를 15도, 30도, 45도의 3개의 경우로 나누어 가상 항로를 설계하였다.

3개의 가상 항로에서 3종류의 선박에 대해 실험을 하였으므로 실험 시나리오는 총 9개가 되며, 각 시나리오별로 10회씩의 시뮬레이션을 실시하였다.

4.2 시뮬레이션을 위한 수학 모델의 구성

본 실험에서의 수학모델은 McCallum의 Heuristic Type Mathematical Model[7]을 이용했다. 이 모델은 유체동력학적인 도함수를 사용한 모델과는 달리 선박운동 시스템을 블랙 박스로 가정하여 도출한 간단한 방정식을 이용하여 선박의 동작을 표현하는 모델이다. 이 모델은 직접적인 접근방법을 사용하기 때문에 상대적으로 실험이 간단하고 사용자의 호응도도 매우 높다. 또한 이 모델은 변환이 간단하고 거의 자동적인 방법으로 새로운 모델 혹은 수정된 모델을 만드는 것이 가능하다. 이 모델에 대한 정확성과 효용성은 이미 많은 연구에서

입증된 바 있다[8][9].

4.2.1 방정식의 유도

(1) 선박의 입력정보와 출력정보

선박의 운동을 Surge, Sway, Yaw라는 3차원의 자유운동만으로 움직이는 동력학적 System으로 보면 선박에 관한 입력정보들은 원하는 타각, D_g 와 원하는 기관, 즉 N_{PD} (desired shaft speed, port)와 N_{SD} (desired shaft speed, starboard)이다. 환경에 관한 입력정보는 바람과 조류로서 바람에 대해서는 진풍향은 WW(wind direction from)로 나타내고, North에 대한 방향을 나타낸다. 또 풍속은 W m/s로 나타낸다. 조류에 관한 입력정보의 경우 선수미에서의 속도는 C_{sb} (current speed at bow), C_{ss} (current speed at stern)로, 그리고 방향은 각각 C_{hb} (current heading at bow), C_{hs} (current heading at stern)로 주어진다.

이러한 입력정보가 주어질 때 이 모델의 출력정보들은 Surge, Sway, Yaw 속도에 대한 상태변수들이 되며, 이들이 적분되어서 이동 거리 및 회두각이 되고 이에 따라 선박의 위치와 선수각이 변하게 된다.

(2) 선박의 축과 운동속도의 유체동력학적인 표시
선박운동방정식의 유도를 위해 선박의 중앙 지점으로부터 선수쪽 방향을 X축으로 하여 O_x 로, 우현쪽을 Y축으로 하여 O_y 로, 선저쪽 방향을 Z축으로 하여 O_z 로 하는 선박에 고정된 수직 직교축이 사용된다. 이 때 Surge 속도는 u (m/s)로 나타내고, Sway 속도는 v (m/s)로, Yaw 율은 r (rad/s)로 나타낸다.

4.2.2 시스템 입력치 모델링

(1) Rudder 제어

Rudder 제어 시스템에 대한 응답은 실제타각 R_r 과 조타기 타각 D_g 와의 차이에 따라 변한다. 실제타각과 조타기타각의 차이가 3도 이내이면 그 응답은 시간상수 $1/K$ (12)초를 갖는 지수로 나타나고, 그 밖의 시간대에 대한 응답은 K (14)각도/SEC의 속도를 가진 일차함수(직선형)로 나타난다고 가정한다[7].

$$R_r = \delta \times R_{rod} \quad (4.1)$$

$$\delta = K(14)R_{tod} \quad Rr < Dg \text{ 일 때} \quad (4.2)$$

$$\delta = -K(14)R_{tod} \quad Rr > Dg \text{ 일 때} \quad (4.3)$$

$$\delta = K(12)(Dg - Rr)/R_{tod} \quad |(Dg - Rr)| < 3 \text{도 일 때} \quad (4.4)$$

여기서 R_{tod} 는 Radian 값을 도수(Degree)로 변환시켜 주는 변환 상수를 나타낸다.

(2) 엔진 응답

엔진 응답은 $1/K(13)$ 초라는 시간상수를 가진 단순한 지수응답으로 나타난다고 가정한다. 따라서 식 (4.5)와 같이 표현된다.

$$\dot{N}_s = K(13)(N_{sd} - N_s) \quad (4.5)$$

여기서 N_{sd} 는 계획축속도를 나타내고 N_s 는 실제 축속도를 나타낸다.

4.2.3 유체동력학적 변수들의 정상상태값의 표현
Surge 속도(u), Sway 속도(v) 그리고 회두각속도(r) 등 주요변수들을 계산하는 방법은 입력정보 상태에 따른 각각의 정상상태 값을 정한 다음, 새로운 값을 얻기 위한 각 변수에 대한 일차미분방정식을 구하는 것이다. 정상상태 값들은 다음과 같이 구할 수 있다.

(1) 정상상태에서의 Surge 속도(U_{ss})

선박의 정상상태에서의 Surge 속도(U_{ss})는 선박 엔진의 실제 Shaft 속도에 비례한다. 또 선박이 선회하고 있는 동안에는 회두각속도의 제공에 비례하는 속력의 손실이 있게 된다. 선박이 후진할 때 Surge 속도는 주어진 Shaft 속도에 비해 떨어지는데, 그 이유는 선박이 후진하는 경우에는 선체의 끌림이 더 크기 때문이다. 그러나 선회하는 동안의 Surge 속력 손실은 거의 같은 비율로 나타나고 가정할 수 있다. 따라서 정상상태에서의 Surge 속도(U_{ss})는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_{ss} = K(4)N_s - K(5)ur^2 \quad u \geq 0 \text{ 일 때} \quad (4.6)$$

$$U_{ss} = K(8)K(4)N_s - K(5)ur^2 \quad u < 0 \text{ 일 때} \quad (4.7)$$

(2) 정상상태에서의 회두각속도(R_{ss})

정상상태에서의 회두각속도(R_{ss})는 타각에 직접적인 영향을 받는다. 대부분 선박의 경우 이 부분은 매우 비선형적인 것으로 알려져 있다. 현재의 방정식에서는 각 선박의 비선형에 대한 적절한 값을 주기 위해 이를 지수관계로 나타낸다. 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$R_{ss} = K(2)\delta^{K(27)} + \beta \quad (4.8)$$

상선의 경우 먹지수 $K(27)$ 은 일반적으로 0.3과 0.7 사이의 값을 취한다[7]. 정상상태에서의 회두각속도(R_{ss})는 선박의 속력에도 영향을 받는다. 선속이 0인 상태에서 타효는 없다. 따라서 저속에서 적절한 타효를 주고, 고속에서는 거기에 상응하는 값으로 증가시켜주기 위한 가중치 $W(u)$ 가 사용된다. 그 가중치는 다음 식 (4.9)와 같다.

$$W(u) = \sqrt{\frac{|u|}{K(9)}} \quad (4.9)$$

추진기의 회전영향도 정상상태에서의 회두각속도에 영향을 준다. 오른쪽으로 회전하는 단추진기 선박의 경우 추진기가 오른쪽으로 회전할 때 추진기의 축력은 선박을 좌현쪽으로 회전시키는 영향을 준다. 이러한 선회효과는 다음 식 (4.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = K(3)(u - K(4)N_s) \quad (4.10)$$

따라서 정상상태의 회두각속도는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{ss} = K(2)\delta^{K(27)}W(u) + K(3)(u - K(4)N_s) \quad (4.11)$$

(3) 정상상태에서의 Sway속도(V_{ss})

환경조건과 Thruster의 영향이 없을 경우 Sway는 단지 선박의 선회에 의해서만 영향을 받는다. 대수속력이 없는 상태에서 선회를 할 경우

에는 Sway 현상은 없다. 그래서 정상상태의 Sway 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ss} = K(7) \cdot r \cdot W(u) \quad (4.12)$$

4.2.4 기본 선박운동방정식

기본적인 선박운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

(1) Surge 속도

Surge 속도에 대한 시간상수는 K(6)이다. 이 시간상수는 여러가지 경우에 따라 서로 다른 조건으로 수정될 필요가 있다. 선박의 속력이 떨어질 때에는 대부분의 선박의 경우 큰 시간상수를 가진다.

본 운동방정식에서는 감속시의 시간상수 변화를 고려하기 위하여 상수 K(10)을 도입하였다. 선박이 선회할 때에는 Drift Angle이 증가하면서 저항수면에 접하는 선체의 측면 면적이 넓어지고 이에 따라 선박의 속력이 빠르게 감소하게 된다. u에 관한 시간상수를 Drift Angle의 증가에 따라 감소시키기 위하여 변수 T_c 가 도입되었다.

$$T_c = (1 - K(11)|a|) \quad (4.13)$$

$T_c > 0.4$ 라는 제한조건하에 Surge 가속도 d1을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d1 = (U_{ss} - Y(1))/(K(6)T_c) \quad Y(1) \leq U_{ss} \text{일 때} \quad (4.14)$$

$$d1 = (U_{ss} - Y(1))/(K(10)K(6)T_c) \quad Y(1) > U_{ss} \text{일 때} \quad (4.15)$$

여기서 Y(1)은 u에 해당되는 Surge 속도를 나타낸다.

(2) Sway 속도

Sway 가속도 d2를 정상상태의 Sway 값과 실제 Sway 값을 사용하여 표현하면 다음과 같이 된다.

$$d2 = (V_{ss} - Y(2)) / K(19) \quad (4.16)$$

여기서 d2는 Sway 가속도를, Y(2)는 v에 해당되는 실제 Sway 속도를 각각 나타낸다.

(3) 회두각속도(Yaw Rate)

타에 대한 선박의 응답은 선박의 운동방향과 Shaft의 회전방향에 따라 변한다. 이것은 아래 일차방정식의 R_{ss} 에 대한 승수에 반영된다. 회두각속도 d3는 다음과 같이 표현된다.

$$d3 = (R_{ss} - Y(3)) / K(1) \quad Y(1) \geq 0, N_s \geq 0 \text{일 때} \quad (4.17)$$

$$d3 = (-R_{ss}/2 - Y(3)) / K(1) \quad Y(1) < 0, N_s < 0 \text{일 때} \quad (4.18)$$

$$d3 = (R_{ss}/2 - Y(3)) / K(1) \quad \text{그 밖의 조건일 경우} \quad (4.19)$$

여기서 Y(3)는 실제 Yaw Rate를 말한다.

4.2.5 환경변수의 모델링

(1) 바람

바람이 선체에 작용하는 힘은 바람의 세기의 제곱에 비례한다고 가정한다. 풍향은 선체의 중심선을 기준으로 분석할 수 있고 O_x 와 O_y 에 대한 결과적인 속도를 계산할 수가 있다. 바람으로 인한 선회효과는 수면상의 선체구조물의 크기와 위치에 따라 달라진다.

선미에 거주구역이 있는 선박들은 바람의 영향으로 풍상측으로 선수가 선회하는 경향을 띠게 되고, 반면에 선체의 중앙부에 거주구역이 있는 선박이나 견현을 높게 가진 선박은 선회하는 것이 아니라 풍하측으로 표류하는 경향을 띠게 된다.

바람에 관한 영향은 UW, VW, 그리고 RW로 표현되며, 이들 값은 선박운동방정식에 바로 부가되어 사용된다.

(2) 조류

조류는 선체 중심선상에서 선수 및 선미에서 각각 선체길이의 1/4에 해당하는 지점에 작용하는 것으로 가정한다. O_x 와 O_y 에 영향을 주는 전체 조류의 영향은 선수미 전체에 영향을 주는 조류 값의 합으로부터 얻어지고, 조류로 인한 선회효과

는 선체 길이의 1/4 지점에 위치하는 지렛대의 측 부분에 작용하는 Sway 조류들의 차이로부터 계산한다.

선박운동방정식에 부가되는 조류의 영향은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$UC = (UCS + UCB) \quad (4.20)$$

$$VC = (VCS + VCB) \quad (4.21)$$

$$RC = (VCB - VCS) \times K(52)/4 \quad (4.22)$$

여기에서 UCS, UCB는 선미 조류 및 선수 조류의 선수 방향 성분값이고, VCS, VCB는 각각의 정횡방향 성분값이다.

4.2.6 선박운동방정식

최종적인 선박운동방정식은 기본적인 선박운동방정식 d1, d2, d3에 바람 및 조류에 의한 영향을 가산하여 구성된다. Surge, Sway 속도 및 Yaw Rate는 다음과 같이 표현되며 이들 값을 적분하면 선수 및 횡방향의 이동거리 및 회두각이 계산되어 다음번 위치 및 Heading이 계산되게 된다. 적분은 Euler 적분법을 이용하여 실행되도록 하였다.

$$d(1) = \int_0^t (d1 + UW/K(23) + UC/K(16))dt \quad (4.23)$$

$$d(2) = \int_0^t (d2 + VW/K(24) + VC/K(17))dt \quad (4.24)$$

$$d(3) = \int_0^t (d3 + RW/K(25) + RC/K(18))dt \quad (4.25)$$

4.3 시뮬레이션 결과 분석

3개의 가상 항로에 3척의 선박을 입력하여, 각 case별로 10회씩 총 90회의 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과를 분석하면 다음과 같다.

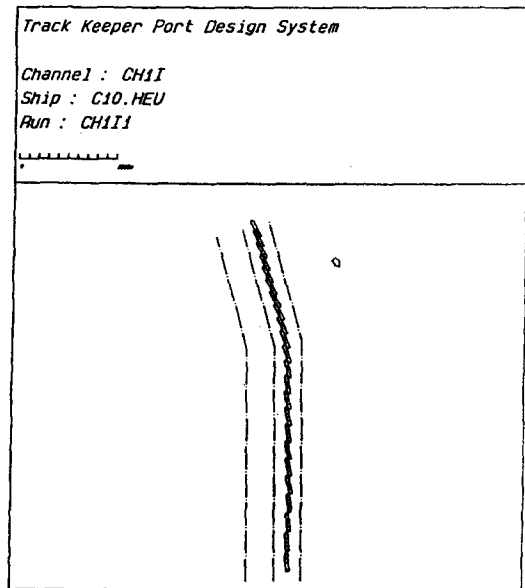
<그림 4-1>, <그림 4-2> 및 <그림 4-3>은 각각 15도, 30도 및 45도의 만곡도를 갖는 가상 항로 상에서 25노트의 정횡 바람을 받으며 항해하는, 조종 성능이 보통인, 50,000GRT급 Container선의 시뮬레이션 결과 항적을 보여 준다. 각 그림에서 알 수 있듯이 만곡도가 커질수록 만곡부에서의 항

적폭이 커진다는 것을 알 수 있다.

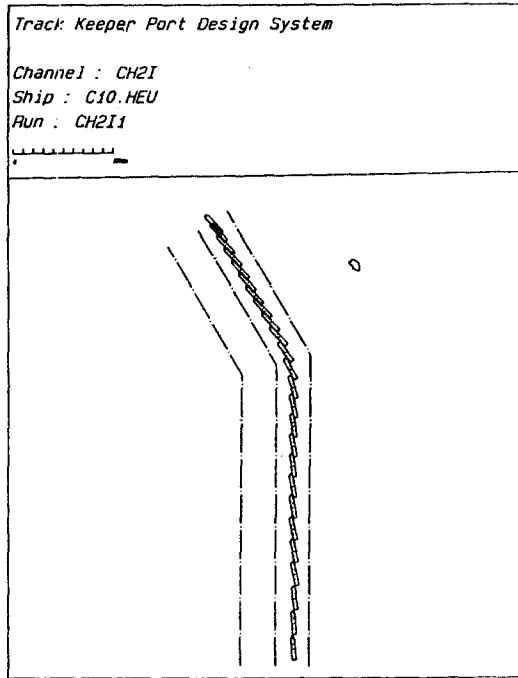
<그림 4-4>는 만곡도 30도를 갖는 가상 항로 상에서 실시한 10회의 시뮬레이션 결과를 종합적으로 플로팅한 것이다. 이 그림에서의 swept path 폭을 확인해 보면 직선 구간의 경우 115 미터이고, 만곡부에서는 178 미터가 됨을 알 수 있다. 이들 값을 실험 대상 선박의 선폭 32 미터로 나누면 각각 3.6B 및 5.6B가 된다. 이들 값에 미국의 항로설계지침에서 권고하는, 항로 외곽선까지의 여유폭 0.6B를 항로의 좌우측에 각각 고려하면 최소 항로폭은 편도 항로의 경우 각각 4.8B 및 6.8B가 된다. 그리고 각각의 값에 여유를 고려하여 정수배 형태로 바꾸면, 조종 성능이 보통인 선박이 출입 대상 선박인 편도 항로의 경우, 최소 항로폭은 직선 구간의 경우 5B, 만곡부의 경우 7B가 된다. 왕복통항 항로의 경우에는 이들 값의 두배를 최소 항로폭으로 한다.

이와 같은 방법으로 3개의 만곡 항로를 대상으로 3척의 선박의 시뮬레이션 결과들을 각각 분석하여 각 경우에 대한 최소 항로폭을 계산하였다. 결과는 5장의 <표 5-1>에 종합적으로 나타내 보인다.

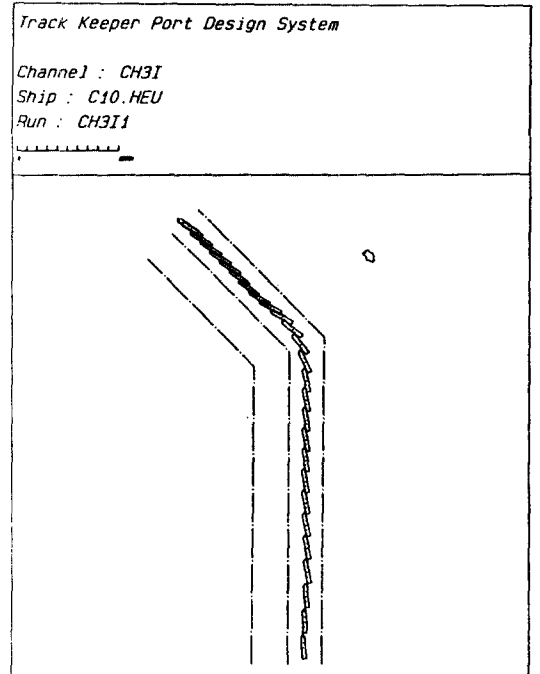
<그림 4-1> 15도 만곡항로에서의 시뮬레이션 결과(바람 : 25노트 정횡풍)



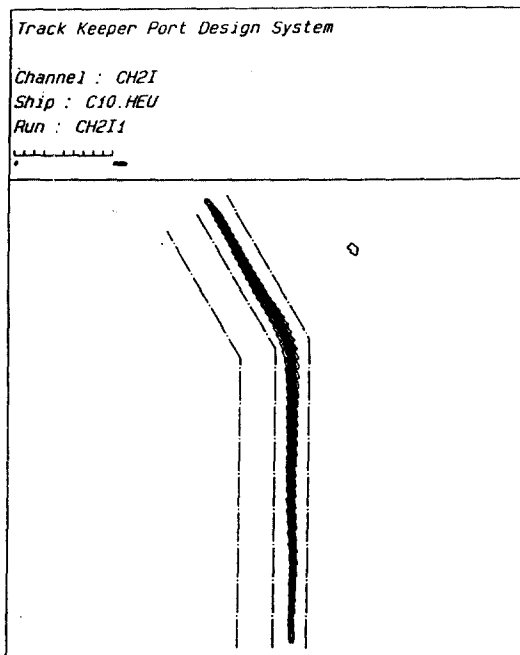
<그림 4-2> 30도 만곡항로에서의 시뮬레이션 결과(바람 : 25노트 정횡풍)



<그림 4-3> 45도 만곡항로에서의 시뮬레이션 결과(바람 : 25노트 정횡풍)



<그림 4-4> 30도 만곡항로에서의 시뮬레이션 결과 종합(바람 : 25노트 정횡풍)



5. 선박 안전을 위한 최적 항로배치 및 항로폭

3절에서의 각 지침상의 항로배치 및 폭에 관한 비교 분석 및 4절에서의 시뮬레이션을 통한 최적 항로폭 계산 결과를 토대로 우리나라의 항만 및 항로 설계자들이 활용할 수 있는 최적 항로배치 및 항로폭 기준을 구체적으로 제시하면 다음과 같다. 항로의 배치의 경우에는 세가지 국제 지침들의 내용들을 종합하되 내용이 상치되는 부분의 경우 안전 확보라는 측면에서 보다 까다로운 기준을 택하여 정리하였으며, 항로폭의 경우 일반 사항들은 세가지 지침들을 참고하되 항로폭은 제4절의 시뮬레이션 분석 결과를 토대로 하여 구체적으로 제시하였다.

5.1 항로의 배치

(1) 항로를 설계할 때에는 해당 해역의 바람,

조류, 파도등을 고려한 선체운동역학 및 육상의 항로표지등의 성능들을 고려하여 그 배치를 결정하여야 한다.

(2) 항로는 가급적 직선 항로가 되도록 설계하는 것이 바람직하다.

(3) 항로의 만곡부는 그 반경이 최소한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 5배는 되어야 하며 가능하면 10배 이상으로 하는 것이 좋다.

(4) 만곡부들 사이의 직선 통항로는 가급적이면 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 10배의 길이를 갖도록 하여야 한다.

(5) 교량등이 있거나 하여 항로가 좁아지는 부분의 경우에는 최소한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 다섯배의 길이를 갖는 직선 통항로를 경계 부분 전후에 두어야 하며, 그 구간에는 특히 양질의 항로표지를 설치해 두어야 한다.

5.2 항로의 폭

(1) 항로의 폭이란 확보된 최저 수심상의 수로의 최소 너비를 말한다.

(2) 항로폭은 다음 <표 5-1>을 기준으로 하여 정하되, 횡방향의 조류가 있는 경우에는 조류로 인한 drifting 효과 값(가장 큰 선박의 길이×sine 최대 편각 β)을 더해 주어야 한다. 조류로 인한 추가 폭을 고려하는 경우에는 가급적 선박운동 시뮬레이션을 통해 항로폭의 안전성 여부를 검증하여야 한다.

(3) 항로 입구의 폭

항로 입구에서는 선박들이 강하고 변화가 많은 조류, 파도, 그리고 기타 항해에 어려움을 주는 여러 가지 요소들에 영향을 받아 항행상에 어려움을 겪게되는 것이 보통이다. 따라서 항로 입구에서의 항로폭을 결정할 때에는 <표 5-1>에 제시된 값에 적절한 여유 값을 보태주어야 한다.

6. 결 론

본 연구에서는 항로의 배치 및 폭에 영향을 미치는 요인들을 분석한 뒤 미국, 일본 및 유럽의 국

<표 5-1> 최소 항로폭

항 로 구 분		항로폭(선폭B의 배수)			
		선박조종성능			
		양호	보통	불량	
양방통행 항 로	직선구간	8B	10B	12B	
	만곡부	15도 만곡	10B	12B	14B
		30도 만곡	12B	14B	16B
		45도 만곡	14B	16B	18B
일방통행 항 로	직선구간	4B	5B	6B	
	만곡부	15도 만곡	5B	6B	7B
		30도 만곡	6B	7B	8B
		45도 만곡	7B	8B	9B

제 항로설계지침들을 비교 분석하였다. 그리고 항로설계 시뮬레이션 기법을 이용하여 안전 최저 항로폭을 선박의 조종 성능별, 항로의 만곡도별로 구한 뒤, 우리나라의 항만 및 항로 설계자들이 이용할 수 있는 항로배치 및 항로폭에 관한 구체적인 기준을 제시하였다.

우리나라의 경제가 급속히 발전함에 따라 해상 물동량이 급증하고 이의 원활한 처리를 위해 대규모 항만 개발 계획을 수립 추진하고 있는 우리나라의 실정을 감안할 때, 본 연구를 통해 제시된 항로의 배치 및 폭에 관한 가이드라인은 현재 활발히 진행되고 있는 우리나라의 항만 개발 사업에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 제시된 안전 항로배치 및 항로폭 기준에 추가하여, 안전 수심 및 선회장의 크기 등에 관한 가이드라인을 설정하는 연구가 필요하며 이는 향후 연구 과제라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] McIlroy, W., "Ship Manoeuvring Response - Simulation Studies at CAORF", *Proceedings of the Fifth CAORF Symposium*, Computer Aided Operations Research Facility(CAORF) at Kings Point, N.Y., May 1983.
- [2] Atkins, D. A., Bertsche, W. R., "Evaluation of the Safety of Ship Navigation in

- Harbours", *Proceedings of Spring Meeting / STAR Symposium*, Coronado, California, 1980, pp. 65-77.
- [3] ICORELS of PIANC, "Optimal Lay-out and Dimensions for the Adjustment to Large Ships of Maritime Fairways in Shallow Seas, Seastraits and Maritime Waterways", *Report of Working Group 4 of PIANC*, Brussel, Belgium, 1980.
- [4] Smith, M. W., Multer, J., Schroeder, K., "Simulator Evaluation of Turn Lighting Effectiveness for Nighttime Piloting", *Proceedings of the Fifth CAORF Symposium*, Computer Aided Operations Research Facility(CAORF) at Kings Point, N.Y., May 1983.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers, *Engineer Manual : Engineering and Design for Hydraulic Design of Deep-draft Navigation Projects*, Engineer Manual No.1110-2-1613, Corps of Engineers, U.S. Department of the Army, Washington, D.C., April 1983.
- [6] Morihira, M., Isiwata, T., Suzuki, S., *Pocket Book for Port Construction*, Sankeido Press, Japan, 1984.
- [7] McCallum, I. R., *The Avimar Ship Mathematical Model Suite Report*, Publication of Maritime Dynamics Ltd., Llantrisant, U.K., Nov. 1988.
- [8] Maritime Dynamics, *Port of Sunderland Simulation Study Report*, Publication of Maritime Dynamics Ltd., Llantrisant, U.K., July 1987.
- [9] Maritime Dynamics, *Second Severn Crossing Ship Simulator Study Report*, Publication of Maritime Dynamics Ltd., Llantrisant, U.K., March 1989.