

형상모델 기반 선박계산 전산프로그램 개발

박상수*, 이규열**

Development of a Ship Calculation Program Based On the Geometric Model

by

Sang-Su Park* and Kyu-Yeul Lee**

요 약

본 논문에서는 유체 정역학적 계산, 용적 계산, 비손상 및 손상시 복원성 그리고 선형 변환을 수행할 수 있는 객체 지향적 선박계산 전산프로그램을 개발하였다. 선박 계산을 위한 선형과 구획 형상을 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) curve wire-frame model로 표현하고, 선형과 구획 단면 형상을 직접 3차원 평면과의 교차 계산을 통해 유체 정역학적 계산과 용적 계산을 수행하였다. 선박의 3차원 정역학적 평형 상태 방정식을 정식화하고, 순차적으로 선형화하여 힘과 모멘트 평형상태의 자세를 구하였다. 상용 선박 계산 프로그램의 결과와 비교하여, 개발 프로그램을 쉽고, 편리하게 사용할 수 있고, 계산의 정확도가 높음을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, a ship calculation program is developed, which performs hydrostatics and volume calculation, intact and damage stability and hull variation. Hull form and compartment geometry are expressed with NURBS curve wire-frame model. Hydrostatics and volume calculation are performed directly with the intersection method between section geometry and 3D planar surface. Equilibrium ship position is calculated with hydrostatic equilibrium equation which is linearized by 1st order Taylor series expansion sequentially. The developed program shows more accurate results and easy uses than the latter.

발 표: 1998년도 대한조선학회 추계연구발표회('98. 11. 13)

접수일자: 1999년 3월 5일, 재접수일자: 1999년 4월 21일

* 서울대학교 조선해양공학과 대학원

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소

기호 설명

- g : Gravitational acceleration
- ρ : Salt water density
- d : Draft
- θ : Trim angle
- ϕ : Heel angle
- M : Ship weight
- L_M : Longitudinal moment of ship weight
- T_M : Transverse moment of ship weight
- V_M : Vertical moment of ship weight
- B : Vertical force of buoyancy
- L_B : Longitudinal moment of buoyancy
- T_B : Transverse moment of buoyancy
- V_B : Vertical moment of buoyancy
- A_W : Waterplane area
- L_W : Waterplane longitudinal moment
- T_W : Waterplane transverse moment
- I_L : Longitudinal moment of the waterplane
- I_T : Transverse moment of the waterplane
- I_P : Centrifugal moment of the waterplane

1. 서론

선박의 설계 과정에서 선박 계산의 역할은 수선하의 배수량과 구획의 용적, 화물의 탑재나 이동 등에 따른 선박의 자세, 외력에 대한 복원성 계산을 하여 주어진 선형의 유체정역학적 특성, 선주요구사항과 국제적 규약의 만족여부를 평가하기 위한 자료를 제공한다.

선박 계산을 위해 국내 조선소에 사용하고 있는 대부분의 상용 선박 계산 프로그램(SIKOB)은 선박 계산만을 위해 개발되어 선형 설계 시스템을 비롯한 여러 설계 시스템과의 연결(Interface)에 많은 노력이 필요하다. 일부 계산 알고리즘의 제약점으로 인해 사용자의 프로그램 사용을 어렵게

하며, 같은 선형에 대한 계산 결과가 입력 데이터 선정에 따라 상이한 결과를 준다. 그리고 선형과 구획의 정의가 실제 형상을 근사화하여 표현하고, 계산 알고리즘이 물리적인 상황과 상이한 근사적인 계산 방법을 사용하여 계산의 정확도가 사용자와 선형에 따라 달라지는 문제점이 있다.

본 논문에서는 형상 설계 시스템과 연결[1]을 통해 정확한 선박의 형상을 입력받게 했으며, 계산에 필요한 데이터 입력을 간단하고 명료하게 하여 데이터 입력의 효율성을 높였다. 실시간 계산 방법으로 유체 정역학 계산과 용적 계산의 정확성을 높였다. 3차원 공간에서 선박의 유체정역학적 평형 상태 방정식[3]을 이용하여 물리적 상황과 일치하는 평형 상태에서의 선박의 자세를 정확히 계산할 수 있도록 하였다.

2. 프로그램의 구성

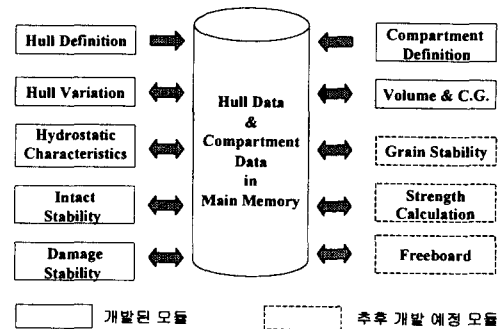


Fig. 1 Functional structure of program

프로그램을 구성하는 선박 계산 모듈들을 Fig. 1에 나타내었다. 선형과 구획 형상 정보를 공유하면서 선형 변환(Hull variation), 유체 정역학 계산(Hydrostatics calculation), 용적과 용적 중심 계산(Volume and center of gravity calculation), 비손상 및 손상 상태의 복원성(Intact and damage stability)을 계산할 수 있는 모듈들로 구성되어 있다. 아울러 정의된 선형 정보를 상용 선박 계산 프로그램(SIKOB)용 선형으로 변환할 수 있는 기능을 가지고 있어, 상용 프로그램과도 데이터 교환이 가능하도록 하였다. 향후 낱알 복원성(Grain

stability), 종강도 계산(Longitudinal Strength calculation), 전현(Freeboard) 계산 모듈은 추가 개발되어야 한다.

3. 선박 계산 전산 프로그램

3.1 선형과 갑판의 정의 방법

(1) 선형의 정의 방법

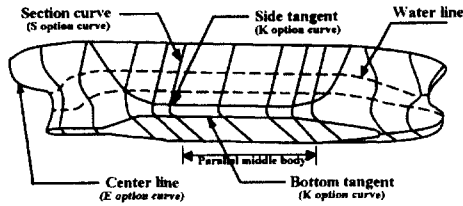


Fig. 2 Hull definition

상용 선박 계산 프로그램(SIKOB)[2]은 선박 계산 목적으로만 선형을 정의하여 사용하기 때문에 선형의 정의가 유연하지 못하고, 형상 표현에 제한이 많다. 또한 가시화 기능이 미흡하여 입력된 선형 형상이 올바르게 정의가 되었는지 확인이 어렵다. 선형 선형 CAD 시스템에서 만들어진 선형을 선박 계산을 위한 선형 데이터 형태로 데이터 변환을 해야 하며, 후행 설계 전산 시스템과의 데이터 연결에 불편함이 있다.

본 논문의 선형정의는 NURBS곡선을 이용한 3D wire-frame model을 기반으로 선형 형상을 정확히 정의할 수 있다. 따라서, 선형의 입력에 유연성과 편리성을 기할 수 있으며, 입력된 선형은 가시화 기능을 통해 쉽게 확인할 수 있으며, 다른 선형 설계 시스템[1]과 연결을 쉽게 할 수 있다.

본 논문의 선형 정의 방법은 Fig. 2에서와 같이 중심선(Center line), 횡단면 형상 곡선(Section curve), 선형의 경계를 정의하는 공간 곡선(Space curve : 예를 들어 Side tangent, Bottom tangent) 등의 곡선을 와이어 프레임 형태로 입력한다. Fig. 2에서 점선으로 표시된 수선(Water line)은 교차 계산에 의해 생성될 수 있으나, 필요하면 입력할 수 있다. 곡선은 기준 위치에 대한 위치와 이름, 곡선의 속성을 입력하여 준다. 곡선의 속성은 다

음의 3가지로 분류된다.

- K : 너클 곡선(Knuckle curve)
- S : 바로 앞 점의 곡선과 형상, 속성이 동일
- E : 곡선에서 잘려진 점은 E속성을 가짐

곡선상의 점들은 좌표와 함께 점의 속성을 입력해 준다. 점의 속성은 다음의 4가지로 분류된다.

- K : 너클 점(Knuckle point)
- L : 다음 점까지 직선으로 연결
- R : 다음 점까지 원호로 연결
- E : 끝 점(End point)

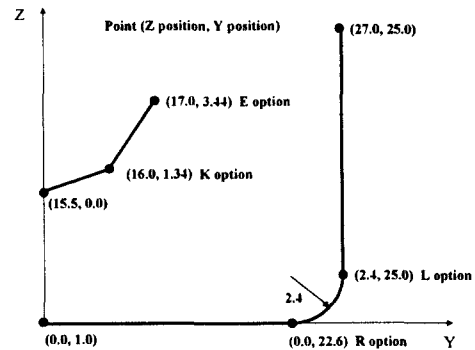


Fig. 3 Section curve example

Fig. 3은 개략적인 선형 횡단면 형상이다. 이 형상에 대해 설계자가 만들어 주는 선형 입력 데이터 형식은 Fig. 4와 같다.

```
SCTI st_tran X 3.0 -5.0 K
// X : YZ평면을 의미
// Station 3에서 선미방향으로 5.0m 위치의 단면
// K : Curve속성(Knuckle Curve를 의미)
15.5 0.0 // Z 좌표 Y 좌표
16.0 1.34 K
// K Option : 이 점에서 곡선이 Knuckle
17.0 3.44 E
// E Option : 이 점에서 곡선하나가 끝남을 의미
0.0 0.0
// 새로운 곡선 시작점. E Option 다음 점
0.0 22.6 R 2.4
// R Option : 다음 점까지 2.4m의 Arc로 연결됨
2.4 25.0 L
// L Option : 다음 점까지 Straight Line으로 연결
27.0 25.0
```

Fig. 4 Input data form of hull definition

(2) 갑판의 정의 방법

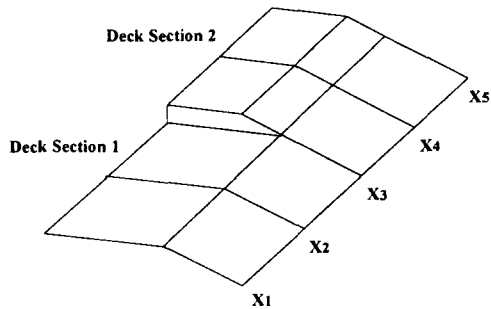


Fig. 5 Deck definition

상용 선박 계산 프로그램은 갑판 단면 형상을 다각형(Polygon), 포물선(Parabolic) 단면 형상으로만 정의할 수 있다. 갑판 현측선(Deck side line)은 사용자가 직접 입력을 해 주어야 하므로, 입력이 불편하고 정확하지 않을 수 있다[2].

이에 반해, 본 논문의 갑판 단면 형상 정의는 선(Line), 원호(Arc), 곡선(Curve)을 사용하므로 형상에 대한 제한이 없다. 갑판 현측선은 갑판 단면 형상과 갑판 원호(Deck round radius)등의 입력된 형상 정보를 이용하여 선형과의 교차 계산으로 갑판 현측선을 자동적으로 생성하므로 쉽고 정확하게 정의할 수 있다.

Fig. 5는 갑판 단면 형상을 구간 $X_1 \sim X_3$ 에서는 Deck section 1, 구간 $X_3 \sim X_5$ 에서는 Deck section 2로 정의한 갑판의 형상을 개략적으로 나타낸 것이다. 이와 같이 구간에서의 갑판 단면 형상을 길이 방향으로 지정함으로써 갑판 정의를 한다. 구간 중간의 갑판 단면 형상이 필요한 경우에는 구간 안에 있는 한 개 이상의 단면형상을 선형 또는 곡선(Cubic B-spline)으로 보간(Interpolation)하여 구간 중간의 갑판 단면 형상을 구해낸다.

갑판 모서리 점을 교차계산으로 구할 때, 선형 단면 형상 정보가 깊이(Depth)까지 주어지지 않거나 수치적으로 생긴 오차로 인해 선형 단면과 갑판 단면의 교차점을 구하지 못하는 경우가 있다. 본 논문에서는 선형 단면 형상 정의의 마지막 점에서 접선(Tangent line)방향의 직선을 구해 그 직선과 갑판 단면과의 교차점을 구한다.

3.2 구획의 정의 방법

(1) 구획 입력 데이터 형식

TABLE 103				
// TABLE TABLE_NO				
// Z-Position Y-Position Flag(L, R, K)				
30.0	10.2	K		
23.2	10.2	K		
16.04	22.5	K		
16.25	30.0	K		
2.4	16.15			
COMPART 1004 NO.4 HOLD				
// COMPART COMPART_NO COMPART_TEXT				
// Frame No, dx, Left Bulkhead No, Right Bulkhead No, Deck No, No of Cuts				
185	0.0	103	0	
213	0.0	103	0	5

Fig. 6 Input data form of compartment definition

Fig. 6과 같이 격벽(Bulkhead) 단면 형상을 먼저 정의하고, 구획을 정의한다. 격벽 단면은 상용 선박 계산 프로그램에서 사용되는 선(Line)뿐 아니라 곡선, 원호를 이용하여 정의된다. 격벽 단면 형상은 테이블 번호(Table No.)에 의해 구별된다. 구획의 시작과 끝 위치, 각각의 위치의 테이블 번호를 지정하여 격벽 단면 형상을 지정한다. 그리고 구획 계산을 위해 생성할 단면의 개수와 갑판의 번호를 같이 지정한다.

(2) 구획의 생성 방법

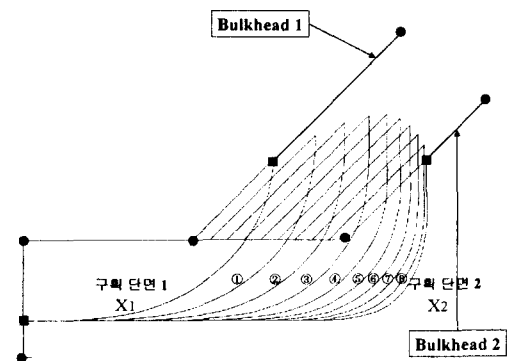


Fig. 7 Compartment section generation

Fig. 7은 구획 정의 구간 X_1 에서 X_2 까지의 시작점 X_1 의 격벽은 Bulkhead 1, 구간 끝점인 X_2 의 격벽은 Bulkhead 2로 지정되어 구획 단면 1, 2의 형상을 구한 모습이다. 구획 계산을 정확하게 하기 위해 사용자는 X_1 에서 X_2 사이의 생성 구획 단면의 개수를 지정할 수 있다. 구획 단면을 더 생성할 때, 구간 중간에서 선박 외곽 단면 형상과 격벽 단면 형상과의 교차 계산이 필요하다. 임의 길이 방향 위치의 선박 외곽 단면 형상은 수선과 길이 방향 곡선을 교차 계산을 하여 구하고, 격벽 단면 형상은 구간 안에 있는 격벽 단면 형상을 구성하는 모든 점들을 직선 또는 곡선으로 보간하여 구한다. 구해진 격벽 형상을 이용하여 구획 단면 형상 정보(Fig. 7에서 ①~③)를 더 생성한다.

3.3 면적, 용적, 중심의 위치 계산

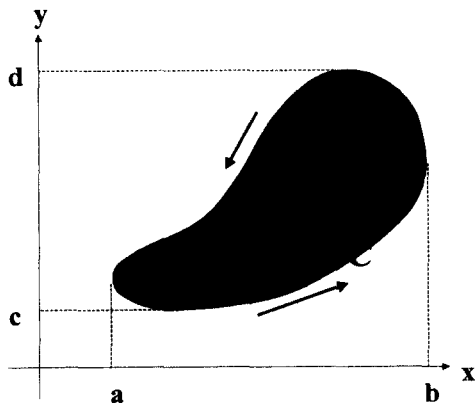


Fig. 8 Green's theorem

상용 선박 계산 프로그램은 선형과 구획 단면 형상을 충분히 많은 직선으로 근사화하여 단면적과 모멘트를 구하고, 길이 방향의 적분은 심슨 법칙(Simpson's rule)을 사용한다. 그러나, 곡률이 큰 곡선은 많은 점들을 사용하여 단면 형상을 직선 근사화를 해야하고, 점의 갯수에도 한계가 있어 정확도가 떨어진다.

본 논문의 단면적 적분과 길이 방향의 적분은 평면에서 직선과 곡선으로 구성된 단순 폐곡선에 의한 영역의 적분 계산(면적, 1차 모멘트, 2차 모멘트, 면적의 중심)을 그린 정리(Green's theorem)

를 적용하여 선적분으로 변환하고, 이를 가우스 구적법(Gauss quadrature)을 이용하여 수치적으로 적분 계산하는 방법을 사용하였다. 따라서, 최소의 데이터를 이용하여 높은 정확도의 단면적과 용적, 모멘트를 계산할 수 있다. 또한 횡단면과 수선면에 공동(Hole)이 있는 경우와 같이 특수한 경우에 대해서도 같은 방법으로 계산할 수 있다.

그린 정리를 이용한 영역의 단면적, 1차 모멘트, 2차 모멘트, 도심의 위치는 다음의 식에 의해 계산될 수 있다.

$$A = \frac{1}{2} \int_c (x dy - y dx) \tag{1}$$

$$M_X = \frac{1}{2} \int_c (x y dy - \frac{1}{2} y^2 dx) \tag{2}$$

$$M_Y = \frac{1}{2} \int_c (\frac{1}{2} x^2 dy - x y dx) \tag{3}$$

$$\bar{X} = M_X / A \tag{4}$$

$$\bar{Y} = M_Y / A \tag{5}$$

$$I_X = \frac{1}{2} \int_c (x y^2 dy - \frac{1}{3} y^3 dx) \tag{6}$$

$$I_Y = \frac{1}{2} \int_c (\frac{1}{3} x^3 dy - y x^2 dx) \tag{7}$$

$$I_P = \frac{1}{2} \int_c (\frac{1}{2} x^2 y dy - \frac{1}{2} y^2 x dx) \tag{8}$$

여기서,

x, y : 단면내의 점의 x, y 좌표값.

dx, dy : x, y 방향의 미분값

A : 영역의 면적

M_X, M_Y : 영역 면적의 X, Y 축 방향 모멘트

\bar{X}, \bar{Y} : 영역 면적의 X, Y 축 방향 도심 위치

I_X, I_Y : 영역 면적의 X, Y 축 방향 2차 모멘트

I_P : 영역 면적의 극 2차 모멘트

위의 적분식(1)~(8)은 용적과 용적의 중심을 구할 경우에도 사용될 수 있다. 그 경우 횡단면적을 길이 방향으로 배치시켜 얻어지는 폐워된 영역을 위의 적분식(1)~(8)을 적용하여 구할 수 있다.

3.4 유체 정역학 계산과 응적 계산

3.4.1 유체 정역학 계산 방법

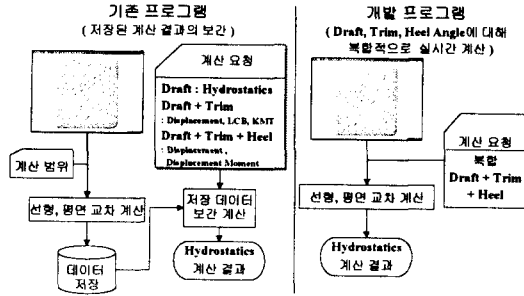


Fig. 9 Hydrostatics calculation method

상용 선박 계산 프로그램은 유체 정역학 계산 (Hydrostatics calculation)을 수행하기 전에 흘수, 트림, 횡경사에 대한 계산 범위와 간격을 입력받는다. 입력받은 범위와 간격에 대해 선형 횡단면과 수선 평면과의 교차 계산으로 교점을 구한다. 수선면과 수선면 아래 횡단면의 면적과 모멘트 길이를 방향으로 적분하여 유체 정역학 값을 계산하여, 저장한다. 사용자와 프로그램이 필요로 하는 유체 정역학 값은 선형 형상과 관계없이 저장된 값을 보간하여 얻는다. 이 방법은 모듈에서 필요한 유체 정역학 값을 저장된 값의 보간에 의해 효율적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만, 유체 정역학 계산의 모든 항목을 선박의 복합적인 자세(흘수, 트림, 횡경사)에서 계산할 수 없고, 계산 범위와 간격에 따라 보간으로 얻는 값이 다르다는 문제점이 있다. 또한 저장된 값의 차수가 클 경우 보간에 의한 오차가 크다는 단점이 있다.

본 논문의 계산 방법은 선박의 복합적인 자세에서 모든 유체 정역학 값을 형상을 이용하여 직접 계산할 수 있다.(Fig. 9 참조) 이 방법은 보간 방법에 비해 계산시간이 많이 소요되지만, 복합적인 상태에 대한 모든 유체 정역학 값을 계산할 수 있으며, 계산의 정확도를 높일 수 있다.

3.4.2 Wigley 선형에 대한 유체 정역학 계산값의 비교

계산 알고리즘을 검증하기 위해 이차 함수로 표

현되는 Wigley포물선형의 유체 정역학적 계산을 수행하였다. Wigley포물선형의 수학적 표현식은 배의 길이, 폭, 흘수를 각각, L, B, d로 정의하면 다음과 같다.

$$y = y(x, z) = \begin{cases} \frac{B}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right\} & |x| < \frac{L}{2}, -d < z < 0 \\ \frac{B}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right\} & |x| < \frac{L}{2}, z \geq 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서는 선박의 길이 264m, 폭 45m, 흘수 16.9m, 깊이 23.2m인 Wigley포물선형을 만들었다.

선형 단면 형상 정의를 위한 점의 갯수를 동일하게 하여, 계획 흘수 16.9m에서의 유체 정역학 계산을 수학적 방법, 개발 프로그램, 상용 프로그램(SIKOB)에 따라 수행하였다. SIKOB은 16m에서 18m사이에 3, 6, 11, 21개의 흘수에 대한 계산값을 보간하였다.

Table 1 Hydrostatics calculation result for wigley hull form

	DISP. MLD	KB	Aw	Trans. Inertia	M.T.C.	KMT	
수학적 계산값	89,232	10,564	7,920	916,457	1,045.44	20.833	
개발 프로그램	89,233	10,563	7,919	916,232	1,045.36	20.830	
SIKOB 흘수 개수	3	89,231	10,560	7,917	917,799	1,046.69	20.824
	6	89,230	10,557	7,919	918,558	1,046.96	20.830
	11	89,230	10,556	7,919	918,562	1,046.97	20.829
	21	89,230	10,556	7,919	918,562	1,046.97	20.828

Table 1에서 수학적 계산값과 개발 프로그램의 계산값은 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 수학적 계산값과 SIKOB 계산값은 면적과 용적에 관련되는 값은 거의 차이가 없지만, 1차 모멘트, 2차 모멘트에 관련된 값은 차이가 많음을 알 수 있다. 이는 SIKOB이 형상과 관계없이 보간에 의해 계산하기 때문에 나타나는 오차로 생각된다.

3.4.3 응적 계산 방법

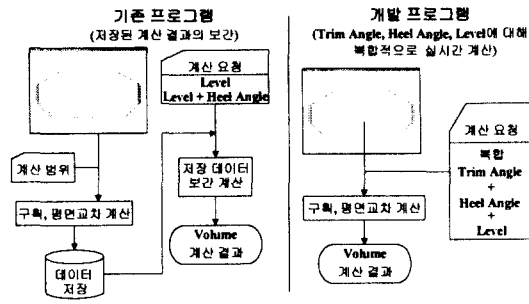


Fig. 10 Volume calculation method

상용 선박 계산 프로그램의 용적 계산 방법은 유체 정역학적 계산과 같이 용적 관련값(Volume, Center of gravity, Moment of inertia 등)을 구획 단면 형상과 관계없이 저장된 값을 보간한다.

이에 반해, 본 논문에서는 구획 단면 형상과 (화물의 높이와 횡경사, 종경사에 의해 정의되는) 3차원 평면과의 교차 계산을 하여 용적 관련값을 직접 계산한다(Fig. 10 참조).

3.4.4 트림이 큰 경우 유동화물의 구획 계산 방법의 개선 방안

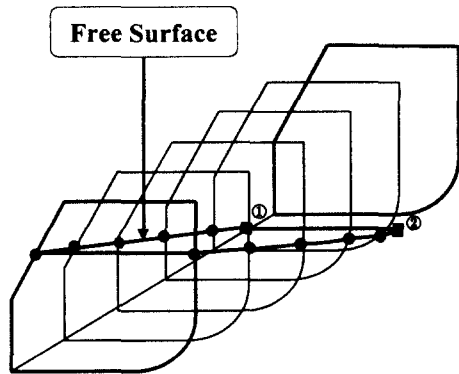


Fig. 11 Face boundary of movable cargo with large trim

구획은 단면 형상 정보만 가지고 있는 와이어 프레임 모델로 정의된다. 따라서, 선박의 자세가 변하여 큰 값의 트림(Trim)을 가지게 되면, 구획 내에 부분적으로 채워진 유동 화물(액체 및 낱알

화물 등)이 이동하여 Fig. 11과 같은 상태가 있을 수 있다. 이 때, 용적(Volume)과 화물 표면 관련 계산을 정확히 하기 위해서는 점 ①, ②를 구해야 한다. 본 논문에서는 구획 단면을 자동적으로 생성하여 점 ①, ②를 근사적으로 구하여 용적 계산의 정확도를 높일 수 있었다.

3.5 정역학적 평형 상태 방정식의 구성

선박 자체가 유체 중에 떠있을 경우, 선박에 화물을 적재·하역하는 경우, 선박 내에서 화물을 이동하는 경우, 선박이 손상을 입었을 경우 등에 선박의 홀수, 트림, 횡경사를 계산하는 것이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 6자유도 운동방정식에서 출발하여 3차원 공간의 정적인 상태에 대한 선박의 평형상태 방정식[3]을 정식화하였다.

3.5.1 선박의 6자유도 운동 방정식

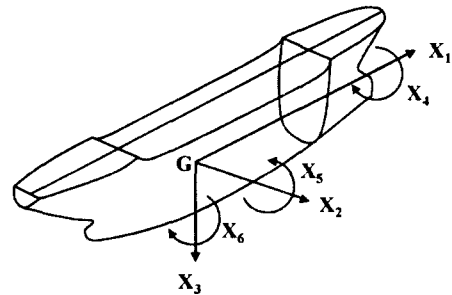


Fig. 12 Axes and ship motion definitions

선박의 운동방정식의 변위는 Fig. 12와 같다.(G는 무게 중심) 선박의 운동은 길이 방향의 평행 이동인 surge, 폭 방향의 평행 이동인 sway, 깊이 방향의 평행 이동인 heave, 길이 방향 축에 대한 회전이동인 roll, 폭 방향 축에 대한 회전이동인 pitch, 깊이 방향의 회전축에 대한 회전이동인 yaw가 있다. 6개의 운동은 다음의 식으로 표현된다[4](Fig. 12 참조).

surge (x_1)

$$(m + a_{11})\ddot{x}_1 + b_{11}\dot{x}_1 = F_{W10}\sin(\omega_e t + \gamma_1) \tag{10}$$

sway (x_2)

$$\begin{aligned}
 & (m + a_{22})\ddot{x}_2 + b_{22}\dot{x}_2 \\
 & + a_{24}\ddot{x}_4 + b_{24}\dot{x}_4 \\
 & + a_{26}\ddot{x}_6 + b_{26}\dot{x}_6 + c_{26}x_6 \\
 & = F_{W20}\sin(\omega_e t + \gamma_2)
 \end{aligned} \tag{11}$$

heave (x₃)

$$\begin{aligned}
 & (m + a_{33})\ddot{x}_3 + b_{33}\dot{x}_3 + c_{33}x_3 \\
 & + [a_{34}\ddot{x}_4 + b_{34}\dot{x}_4 + c_{34}x_4] \\
 & + a_{35}\ddot{x}_5 + b_{35}\dot{x}_5 + c_{35}x_5 \\
 & = F_{S3} + F_{W30}\sin(\omega_e t + \gamma_3)
 \end{aligned} \tag{12}$$

roll (x₄)

$$\begin{aligned}
 & (I_{44} + a_{44})\ddot{x}_4 + b_{44}\dot{x}_4 + c_{44}x_4 \\
 & + a_{42}\ddot{x}_2 + b_{42}\dot{x}_2 \\
 & + [a_{43}\ddot{x}_3 + b_{43}\dot{x}_3 + c_{43}x_3] \\
 & + [a_{45}\ddot{x}_5 + b_{45}\dot{x}_5 + c_{45}x_5] \\
 & + a_{46}\ddot{x}_6 + b_{46}\dot{x}_6 + c_{46}x_6 \\
 & = F_{S4} + F_{W40}\sin(\omega_e t + \gamma_4)
 \end{aligned} \tag{13}$$

pitch (x₅)

$$\begin{aligned}
 & (I_{55} + a_{55})\ddot{x}_5 + b_{55}\dot{x}_5 + c_{55}x_5 \\
 & + a_{53}\ddot{x}_3 + b_{53}\dot{x}_3 + c_{53}x_3 \\
 & + [a_{54}\ddot{x}_4 + b_{54}\dot{x}_4 + c_{54}x_4] \\
 & = F_{S5} + F_{W50}\sin(\omega_e t + \gamma_5)
 \end{aligned} \tag{14}$$

yaw (x₆)

$$\begin{aligned}
 & (I_{66} + a_{66})\ddot{x}_6 + b_{66}\dot{x}_6 + c_{66}x_6 \\
 & + a_{62}\ddot{x}_2 + b_{62}\dot{x}_2 \\
 & + a_{64}\ddot{x}_4 + b_{64}\dot{x}_4 \\
 & = F_{W60}\sin(\omega_e t + \gamma_6)
 \end{aligned} \tag{15}$$

여기서, 외력은 정적 상태에서의 복원력(F_S)과 파도(Wave)에 의한 외력(F_W)의 합으로 표시된다.

6자유도 운동 방정식은 6개의 운동이 서로 연동되어 있다. 예를 들어 heave 운동은 물리적으로 서로 연동되는 운동은 roll과 pitch 운동으로 볼 수 있다. 일반적으로 선박의 수선면이 좌우 대칭이기 때문에 roll 운동은 heave와 연동성이 없다고 보아왔다. 하지만, 선박이 비대칭 손상을 입었을 경우처럼 횡경사가 클 경우에, 수선면은 대개 좌우 대칭이 아니다. 이 때 roll에 의한 heave의 운동항 $[a_{34}\ddot{x}_4 + b_{34}\dot{x}_4 + c_{34}x_4]$ 은 무시할 수 없는 크기를 가질 수 있다. 따라서, 본 논문은 roll과 pitch에 동시에 연동된 heave 운동 방정식, heave과 pitch 운동에 연동된 roll 운동 방정식, roll과 연동

된 pitch 운동 방정식을 구성하였다.

6개의 운동 방정식에서 본 논문은 정역학 상태에서 수직 방향의 운동(heave, roll, pitch)에 대한 식만 고찰하고자 한다. 따라서, 정적 복원력, 복원 모멘트, 힘, 모멘트에 관한 항만을 취하면, 위의 6개의 방정식은 다음의 3개의 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned}
 & c_{33}x_3 + c_{34}x_4 + c_{35}x_5 \\
 & = F_{S3} \\
 & = M - B(d, \theta, \phi)
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 & c_{43}x_3 + c_{44}x_4 + c_{45}x_5 \\
 & = F_{S4} \\
 & = L_M(\theta, \phi) - L_B(d, \theta, \phi)
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 & c_{53}x_3 + c_{54}x_4 + c_{55}x_5 \\
 & = F_{S5} \\
 & = T_M(\theta, \phi) - T_B(d, \theta, \phi)
 \end{aligned} \tag{18}$$

3.5.2 선박의 평형 상태 방정식

수식 전개를 편리하게 하기 위해서 선형과 구획의 형상을 표현하기 위해 사용된 선체 고정 좌표계(Body fixed coordinate system)와 더불어 선박의 자세에 따라 변하는 수선면 고정 좌표계(Water surface fixed coordinate system)를 정의하여 사용한다(Fig. 13 참조).

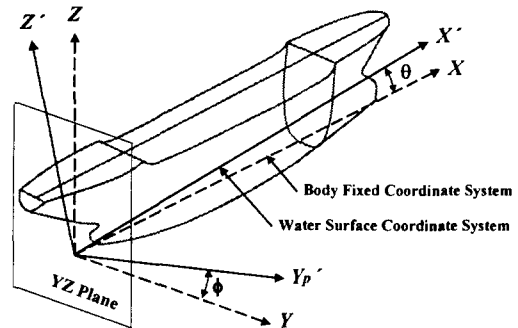


Fig. 13 Coordinate system

여기서,

θ (Trim angle) : XZ평면에서 X축과 수선면 사이의 각

ϕ (Heel angle) : Y축과 Y'축을 YZ평면에 투사된 Yp'축 사이의 각

선체 고정 좌표계와 수선면 고정 좌표계의 변환식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta - y \sin \theta \sin \phi + z \sin \theta \cos \phi \\ y' &= y \cos \phi + z \sin \phi \\ z' &= -x \sin \theta - y \cos \theta \sin \phi + z \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (19)$$

(1) 부력 함수의 선형화

부력은 홀수(d), 트림각(θ), 횡경사각(ϕ)에 대한 비선형 함수이다. 만일 홀수, 트림각, 횡경사각의 변화가 미소하다면 선형화할 수 있다. 부력의 수직력과 모멘트를 홀수, 트림각, 횡경사각에 대한 순차적 선형화한 식은 다음과 같다. (여기서 순차적이란 의미는 다음과 같다. d^k, θ^k, ϕ^k 의 자세에서 $d^{k+1}, \theta^{k+1}, \phi^{k+1}$ 의 자세를 구하고, 평형 상태인지 판단한다. 평형 상태가 아닐 경우, 선박의 자세를 구하는 과정을 $k=0, 1, 2, 3, \dots$ 에 대하여 순차적으로 반복하여 평형 상태의 자세를 찾는다.)

$$\begin{aligned} B^{k+1} &= B^k(d, \theta, \phi) + \frac{\partial B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) \\ &+ \frac{\partial B}{\partial \theta}(\theta^{k+1} - \theta^k) + \frac{\partial B}{\partial \phi}(\phi^{k+1} - \phi^k) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} L_B^{k+1} &= L_B^k(d, \theta, \phi) + \frac{\partial L_B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) \\ &+ \frac{\partial L_B}{\partial \theta}(\theta^{k+1} - \theta^k) + \frac{\partial L_B}{\partial \phi}(\phi^{k+1} - \phi^k) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} T_B^{k+1} &= T_B^k(d, \theta, \phi) + \frac{\partial T_B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) \\ &+ \frac{\partial T_B}{\partial \theta}(\theta^{k+1} - \theta^k) + \frac{\partial T_B}{\partial \phi}(\phi^{k+1} - \phi^k) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, 부력의 수직력과 모멘트는 수선면 고정 좌표계에서의 계산값이다.

식(20), (21), (22)는 홀수, 트림각, 횡경사각이 (k)상태에서 ($k+1$)상태로 변화했을 경우, 부력의 수직력과 길이방향, 폭방향의 모멘트가 얼마나 변하는지를 구할 수 있다. 그리고 수직력과 모멘트의 변화량을 알면, 홀수, 트림, 횡경사의 변화량을 구할 수 있다. 예를 들어, 수직력의 방정식에서 트림각과 횡경사각의 변화가 없고, 홀수만 변하면 부력의 변화량은 $\frac{\partial B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) = \rho g A_{\text{wet}} \delta d$ 로 계산된다. 반대로 부력의 변화량을 알고 홀수만

변한다고 가정하면, T.P.C(센티미터당 배수 톤수)로 나누어 평균 홀수의 변화량을 구할 수 있다.

(2) 중량 함수의 선형화

중량의 수직력과 모멘트에 대한 방정식을 순차적 선형화한 식은 다음과 같다.

$$M^{k+1} = M^k \quad (23)$$

$$\begin{aligned} L_M^{k+1} &= L_M^k(\theta, \phi) \\ &+ \frac{\partial L_M}{\partial \theta}(\theta^{k+1} - \theta^k) + \frac{\partial L_M}{\partial \phi}(\phi^{k+1} - \phi^k) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} T_M^{k+1} &= T_M^k(\theta, \phi) \\ &+ \frac{\partial T_M}{\partial \theta}(\theta^{k+1} - \theta^k) + \frac{\partial T_M}{\partial \phi}(\phi^{k+1} - \phi^k) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, 중량의 수직력과 모멘트는 수선면 고정 좌표계에서의 계산값이다.

중량의 수직력은 좌표계와 선박의 자세에 따라 변화하는 양이 아니다. 중량의 길이와 폭 방향의 모멘트는 선체 고정 좌표계에서는 변하는 값이 아니지만, 식(19)의 좌표계 변환에 의해 수선면 고정 좌표계에서는 변하는 값이다.

(3) 중량과 부력의 평형 상태

정역학적 평형 상태는 부력과 중량의 수직력과 모멘트가 일치할 경우이므로 평형 상태 방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$B^{k+1} = M^{k+1} \quad (26)$$

$$L_B^{k+1} = L_M^{k+1} \quad (27)$$

$$T_B^{k+1} = T_M^{k+1} \quad (28)$$

식(20)과 식(23)을 식(26)에, 식(21)과 식(24)을 식(27)에, 식(22)와 식(25)을 식(28)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M^k - B^k(d, \theta, \phi) & \\ &= \frac{\partial B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) + \frac{\partial B}{\partial \theta}(\theta^{k+1} - \theta^k) \\ &+ \frac{\partial B}{\partial \phi}(\phi^{k+1} - \phi^k) \end{aligned} \quad (29)$$

$$L_M^k(\theta, \phi) - L_B^k(d, \theta, \phi) \tag{30}$$

$$= \frac{\partial L_B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) + \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} - \frac{\partial L_M}{\partial \theta}\right)(\theta^{k+1} - \theta^k) + \left(\frac{\partial L_B}{\partial \phi} - \frac{\partial L_M}{\partial \phi}\right)(\phi^{k+1} - \phi^k)$$

$$T_M^k(\theta, \phi) - T_B^k(d, \theta, \phi) \tag{31}$$

$$= \frac{\partial T_B}{\partial d}(d^{k+1} - d^k) + \left(\frac{\partial T_B}{\partial \theta} - \frac{\partial T_M}{\partial \theta}\right)(\theta^{k+1} - \theta^k) + \left(\frac{\partial T_B}{\partial \phi} - \frac{\partial T_M}{\partial \phi}\right)(\phi^{k+1} - \phi^k)$$

식(29), 식(30), 식(31)의 선형방정식은 식(32)의 행렬식으로 표현된다.

$$A^K = B^K \cdot X^{K+1} \tag{32}$$

$$A^K = \begin{bmatrix} M^k - B^k(d, \theta, \phi) \\ L_M^k(\theta, \phi) - L_B^k(d, \theta, \phi) \\ T_M^k(\theta, \phi) - T_B^k(d, \theta, \phi) \end{bmatrix}$$

$$B^K = \begin{bmatrix} \frac{\partial B}{\partial d} & \frac{\partial B}{\partial \theta} & \frac{\partial B}{\partial \phi} \\ \frac{\partial L_B}{\partial d} \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} - \frac{\partial L_M}{\partial \theta}\right) & \left(\frac{\partial L_B}{\partial \phi} - \frac{\partial L_M}{\partial \phi}\right) \\ \frac{\partial T_B}{\partial d} \left(\frac{\partial T_B}{\partial \theta} - \frac{\partial T_M}{\partial \theta}\right) & \left(\frac{\partial T_B}{\partial \phi} - \frac{\partial T_M}{\partial \phi}\right) \end{bmatrix}$$

$$X^{K+1} = \begin{bmatrix} d^{k+1} - d^k \\ \theta^{k+1} - \theta^k \\ \phi^{k+1} - \phi^k \end{bmatrix}$$

(4) 미소 자세 변화 구하는 과정

미소 자세 변화가 발생한 초기 상태($k=0$)에서의 흘수를 d^0 , 종경사각을 θ^0 , 횡경사각을 ϕ^0 라고 하면, 다음 상태($k=1$)의 선박의 흘수(d^1), 종경사각(θ^1), 횡경사각(ϕ^1)을 식(32)에 A^0 , B^0 의 값을 대입하여 구한다. 구해진 흘수(d^1), 종경사(θ^1)와 횡경사(ϕ^1)에서의 X^1 이 어떤 작은 값보다 크면(즉 평형상태를 만족하지

않으면), 식(32)에 현재 상태($k=1$)의 유체 정역학 값(A^K , B^K)을 대입하여 X^{K+1} 을 반복 계산(Iteration)하여 구한다.

반복 계산시 B^K 의 계수들을 흘수, 트림각, 횡경사각에 의해 정의되는 수선면과 선형의 교차 계산으로 구해야 한다. 각 계수를 유체정역학적 계산값들로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial B}{\partial d} - \frac{\partial W}{\partial d} = \rho g A_W - 0 = C_{33} \tag{33}$$

$$\frac{\partial B}{\partial \theta} - \frac{\partial W}{\partial \theta} = \rho g L_W - 0 = C_{35} \tag{34}$$

$$\frac{\partial B}{\partial \phi} - \frac{\partial W}{\partial \phi} = \rho g T_W \cos \theta - 0 = C_{34} \tag{35}$$

$$\frac{\partial L_B}{\partial d} - \frac{\partial L_W}{\partial d} = \rho g L_W - 0 = C_{53} \tag{36}$$

$$\frac{\partial L_B}{\partial \theta} - \frac{\partial L_W}{\partial \theta} = \rho g (I_L + V_B) - V_W = C_{55} \tag{37}$$

$$\frac{\partial L_B}{\partial \phi} - \frac{\partial L_W}{\partial \phi} = \rho g I_P \cos \theta - 0 = C_{54} \tag{38}$$

$$\frac{\partial T_B}{\partial d} - \frac{\partial T_W}{\partial d} = \rho g T_W - 0 = C_{43} \tag{39}$$

$$\frac{\partial T_B}{\partial \theta} - \frac{\partial T_W}{\partial \theta} = \rho g I_P - 0 = C_{45} \tag{40}$$

$$\frac{\partial T_B}{\partial \phi} - \frac{\partial T_W}{\partial \phi} = \rho g (I_T + V_B) \cos \theta - V_W \cos \theta = C_{44} \tag{41}$$

식(41)에서 C_{44} 의 값을 배수 용적으로 나누면, $(BM + KB - KG) \cdot \cos \theta = GM \cdot \cos \theta$ 로 나타낼 수 있다. $\cos \theta$ 의 값이 곱해지는 이유는 횡경사각(ϕ)이 X' 축이 아닌 X축을 중심으로 회전하므로 인해 발생하는 트림에 대한 수정량을 계산해 주기 위한 계수이다.

3.5.3 구획내 유동 화물 이동시 GZ 계산

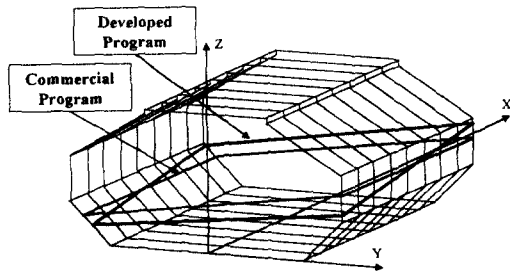


Fig. 14 Calculation condition of movable cargo for GZ calculation

선박의 안정성을 평가하는 기준인 GZ값은 구획내 유동 화물 이동을 고려하면, 다음과 같다.

$$G_2Z = KN - (KG + \Delta Z_G) \sin \phi - (TCG + \Delta Y_G) \cos \phi \quad (42)$$

선체 고정 좌표계에서,

KG : 높이 방향 무게 중심 위치

TCG : 폭 방향 무게 중심 위치

$$\Delta Y_G = \frac{\sum (\Delta y_G \cdot w)}{M}$$

$$\Delta Z_G = \frac{\sum (\Delta z_G \cdot w)}{M}$$

$\Delta x_G, \Delta y_G, \Delta z_G$: 경사 상태에서 유동 화물의 무게 중심 이동량

w : 구획내의 유동 화물 중량

상용 선박 계산 프로그램(SIKOB)은 식(42)의 $\Delta Z_G, \Delta Y_G$ 의 값을 선박의 횡경사만에 대한 2차원적인 유동 화물(유체 화물 또는 낱알 화물)의 무게 중심 이동량만을 계산한다.(Fig. 14 참조)

이에 반해, 본 논문에서 개발한 프로그램은 실제 3차원적인 유동 화물의 무게 중심 이동량을 계산하여 식(42)에 적용한다.

3.5.4 평형 상태 계산시 유동화물의 무게 중심 이동 영향

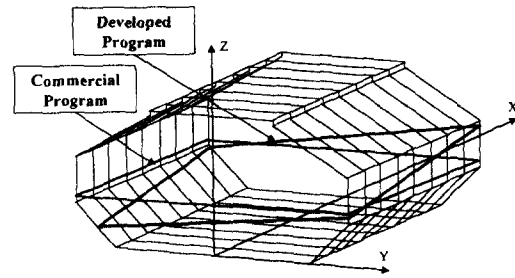


Fig. 15 Calculation condition of movable cargo with ship inclined

선박의 평형 상태를 찾기 위한 정역학적 평형 상태 방정식(32)에서 A^K 는 새로운 자세에서 매번 계산되어야 한다. 본 논문에서 개발한 프로그램은 새로운 자세마다 이동하는 유동 화물의 무게 중심 이동량을 계산하여 식(32)에 대입한다.

이에 반해, 상용 선박 계산 프로그램은 흘수와 트림에 대한 2차원 평형 상태 방정식을 사용하고, 유동 화물에 의한 무게 중심의 변화량을 고려하지 않고 평형 상태의 자세를 계산한다.

3.5.5 손상시 선박의 자세와 GZ 계산

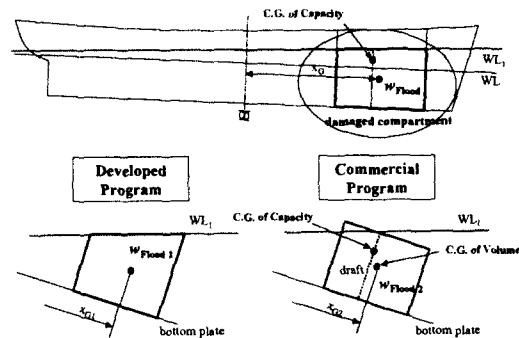


Fig. 16 Calculation of flooding water

손상시의 선박 계산은 손상을 입은 구획의 침입수를 계산하여, 손상 후의 선박의 자세와 복원성을 계산한다. 상용 선박 계산 프로그램은 손상 구획 용적의 길이 방향 중심 위치의 흘수를 기준으로 횡경사만 있는 2차원적인 평면을 침입수의 수선면으로 근사화하여 침입수의 양을 계산한다(Fig.

14, Fig. 16 참조). 그리고 횡경사는 직접 구하지 못하고, GZ 곡선에서 횡경사 모멘트와 평형을 이루는 GZ값에 대응하는 경사각을 손상후 횡경사로 한다.

이에 반해, 개발 프로그램은 실제 3차원적인 수 선면을 선형과 구획 단면 형상과의 교차 계산으로 침입수의 양을 정확히 계산할 수 있다. 침입수에 대한 중량과 모멘트를 식(32)의 A^K 에 대입하여 손상 후 흘수, 트림각, 횡경사각을 계산할 수 있다.

3.6 Hull Variation

- (1) 주요 치수의 변환과 국부 선형 요소의 변형
주요 치수의 변환과 국부 선형 요소의 변형은 [5]에서 제안된 변형 함수 방법을 사용한다.
- (2) Cp curve 변환
본 논문에서 사용된 Cp curve 변환은 다음의 4가지 방법을 사용하였다[6].
 - 1) 1-Cp Method
 - 2) Lackenby Method
 - 3) Swing Method
 - 4) Weighted Modified Swing Method

4. 선박 계산 예

4.1 Hull Definition

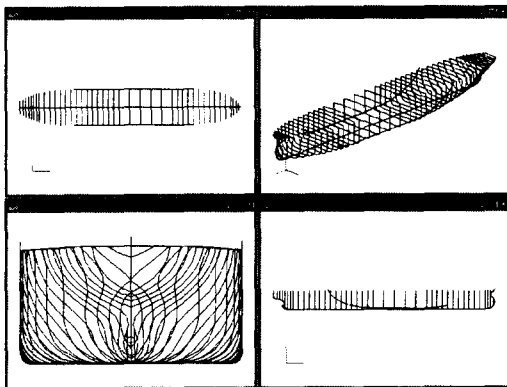


Fig. 17 Wire-frame hull model for 150K bulk carrier

Fig. 17에는 길이 264m, 폭 45m, 흘수 16.9m, 깊이 23.2m인 150K Bulk Carrier의 Wire-frame hull model이 나타나 있다.

4.2 Compartment Definition

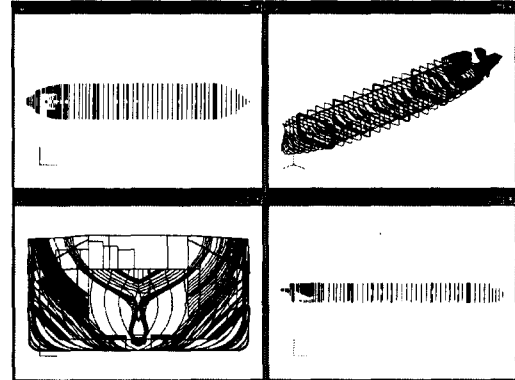


Fig. 18 Wire-frame compartment model for 150K Bulk Carrier

Fig. 18은 150K Bulk Carrier의 구획을 모델링 (Modelling)한 결과를 가시화한 것이다.

4.3 Hydrostatics Calculation

(1) 150K Bulk Carrier

개발 프로그램과 SIKOB을 이용하여 150K Bulk Carrier에 대한 유체 정역학적 계산 결과를 Table 2에 정리하였다

Table 2 Hydrostatics calculation result of 150K Bulk Carrier

DRAFT	DISPL	TPC	MTC	LCB
16.9	168962	106.9	1980.1	8.547
	169105	109.7	1985.2	8.430
DRAFT	LCF	KMT	C _B	WTS.
16.9	0.324	18.590	0.8210	17871
	0.414	18.606	0.8204	17699

Legend :
 개발 프로그램에 의한 값
 상용 프로그램(SIKOB)에 의한 값

Table 2에서 계산값의 차이는 선형 입력 방법과 유체 정역학적 계산 방법의 차이에서 나타난다고 본다.

(2) Multi Hull Ship

길이 120m, 폭 32m, 흘수 3.8m인 쌍동선에 대한 선형 정의는 다음과 같다.

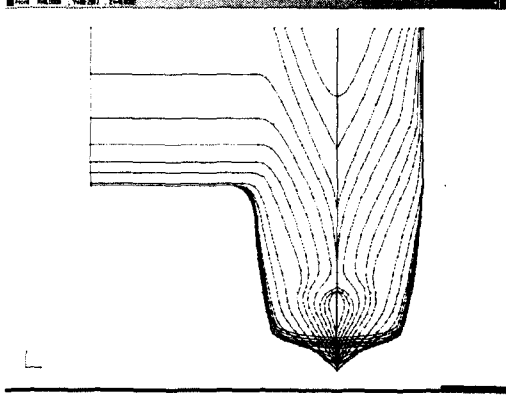


Fig. 19 Wire-frame hull model for multi hull ship

개발 프로그램을 이용하여 계획 흘수 3.8m에서의 Multi Hull Ship에 대한 유체 정역학적 계산 결과를 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Hydrostatics calculation result of multi hull ship

DRAFT	DISPL.	TPC	MTC	LCB
3.8	3485	13.9	103.7	-9.349
DRAFT	LCF	KMT	C _B	WTS.
3.8	-11.232	61.023	0.2305	2475

4.4 Volume Calculation

Fig. 18의 구획 정의에 대한 용적 계산 결과를 Table 4에 정리를 하였다.

Table 4 Compartment calculation result of 150K Bulk Carrier

Name	VOLUM E	Center of Volume			Tran. Inertia
		LPP/2	BL	CL	
No.5 HOLD	19839.4	12.36	12.562	0.000	182857.5
No.2 W.B.TK (P&S)	10388.1	72.09	10.699	0.000	322559.7
	10344.2	72.02	10.636	0.000	322860.0

위의 구획 계산값에서, 선 조각(Line segment)

으로만 정의된 구획 No. 5 HOLD의 계산값은 서로 거의 일치하지만, 구획 단면이 곡선으로 정의되는 No. 2 W.B.TK의 계산값은 약간 차이를 알 수 있다(3.2절, 3.4.3절 참조).

4.5 비손상시의 선박의 자세와 GZ값 계산

150K Bulk Carrier의 구획내에 유동화물을 50% 채운 상태에서 선박의 자세와 GZ값 계산 결과를 정리하였다. Table 5의 계산 결과에서 선박의 자세는 2차원 평형 상태만 계산해도 충분함을 알 수 있다. 하지만 Fig. 20의 GZ값 계산 결과 그래프(실선은 개발 프로그램의 계산 결과, 점선은 상용 프로그램의 계산 결과)는 부분적으로 채워진 유동화물의 선박 자세에 따른 이동량은 무시할 수 없음을 보여준다(3.5.4절 참조).

SIKOB은 복합적인 선박의 자세에서 모든 유체 정역학 항목에 대한 계산을 할 수 없다. 따라서, Table 5에서 계산되지 못한 값은 흘수별로 계산된 Table 2를 이용하여 근사적 값을 알아낼 수밖에 없다. 하지만, 개발 프로그램은 Table 5의 모든 유체 정역학 값을 최종적인 선박의 평형 상태에서 선형과 수선면과의 교차 계산으로 직접 계산할 수 있다.

Table 5 Ship equilibrium position and hydrostatics(50 % Filling)

MEAN DRAFT (M)	7.258	M.T.C. (TON-M)	1515.127
AFTER DRAFT (M)	7.250	T.P.C. (TON)	96.993
FORE DRAFT (M)	5.177	KMT (M)	24.872
TRIM (M)	5.167	V.C.G. (M)	24.938
	9.338		9.572
	9.332		9.574
DISP. (TON)	69833.4	GM (M)	15.300
	69833.0		15.364
L.C.G. (M)	21.323	GGo (M)	11.867
	21.261		12.156
L.C.B. (M)	21.418	GoM (M)	3.432
	---		3.208
L.C.F. (M)	12.159	T.C.G. (M)	0.041
	---		0.023
HEEL ANGLE (DEGREE)	0.150	T.C.B. (M)	0.055
	---		---

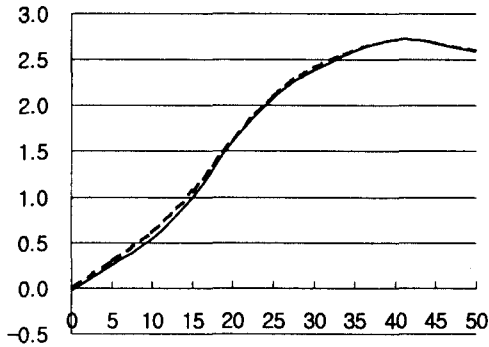


Fig. 20 GZ curve(50% filling)

4.6 손상시 선박의 자세 계산

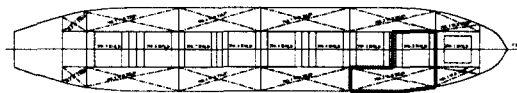


Fig. 21 Forebody damage

150K Bulk Carrier의 선수부 손상 전·후 상태는 Table 6과 같이 정리될 수 있다.

Table 6 Initial and final ship position

	손상전 상태	손상후 상태
ANGLE OF HEEL	0.10	4.36
	0.00	4.64
DRAFT AT AP	16.900	14.106
	16.887	14.040
DRAFT AT FP	16.899	23.788
	16.884	23.971
TRIM	0.002	-9.682
	0.003	-9.931

Table 6에서 손상 전후 자세에서 개발 프로그램과 SIKOB은 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 SIKOB이 횡경사만 있는 근사화된 2차원 수선면으로 침입수의 양을 계산하고, 2차원 평형 상태 방정식에 의해 흘수와 트림을 계산하고 GZ곡선에서 근사적으로 횡경사를 계산하기 때문이다.

개발 프로그램은 3차원 수선면으로 침입수의 양을 정확히 계산하고, 3차원 평형 상태 방정식에 의해 흘수, 트림, 횡경사를 직접 계산한다.

5. 결론

본 연구는 종래의 선박 계산 전산 프로그램의 문제점을 해결하고, 선박 설계 과정에서 선형 설계 시스템과의 연결(Interface)을 통해 반복적인 선박 설계의 효율화를 기할 수 있는 전산 선박 계산 프로그램을 개발하였다.

개발된 프로그램을 이용하여 수학적 선형과 실제선 선형에 대한 선박 계산을 수행하고, 그 결과를 상용 선박 계산 프로그램의 결과와 비교해보았다. 개발 프로그램을 사용자가 쉽고, 그리고 편리하게 사용할 수 있었고, 계산의 정확도가 높음을 알 수 있었다. 개발 프로그램을 이용하여 선박 설계 과정에서 선박 계산을 위한 직·간접적인 노력의 절감이 가능하리라고 본다.

본 연구에서 개발된 선박 계산 프로그램의 선형 정의 방법에 의해서는 tangent curve를 정의할 수 없고, 수선의 끝단 원호(Round) 부분을 정의할 수 없는 단점을 지니고 있다. 구획 정의가 단면 형상 기반이므로 단면 형상을 정의하기 어려운 주름 격벽(Corrugated bulkhead)을 가진 구획의 정의가 어렵다. 따라서 와이어 프레임 모델이 아닌 곡면(Surface) 기반 혹은 솔리드(Solid) 기반의 선형과 구획 정의를 이용한 선박 계산 전산 프로그램이 개발되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 임중현, 이규열, "베지에 곡선모델(드 카스텔조 알고리즘)을 이용한 곡면 통합 모델링 기법", 대한조선학회논문집, 제34권, 제4호, 1997.
- [2] SIKOB Reference Manual.
- [3] H. Söding, "Naval Architecture Calculations", WEGEMT, 1978.
- [4] Lloyd A.R.J.M., "Seakeeping", Ellis Horwood Limited, 1989
- [5] 최영복, 이규열, "연관성 형상 객체에 기초한 선형설계 전산시스템에 관한 연구", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 56-60. 1997.
- [6] H. Lackenby, "On the systematic Geometrical Variation of Ship Forms", Trans. RINA, Vol.92, pp.289-316, 1950.