

## 선체주위의 점성유동 계산을 위한 3차원 공간 격자계 생성방법

김우전\*, 김도현\*, 반석호\*

### Development of 3-D Field Grid Generating Method for Viscous Flow Calculation around a Practical Hull Form

by

Wu-Joan Kim\*, Do-Hyun Kim\* and Suak-Ho Van\*

#### 요 약

선체주위의 점성유동을 계산하기 위해서는 수치계산을 위한 3차원 공간 격자계가 필요하다. 본 논문에서는 타원형 미분 방정식인 Poisson 방정식의 해를 이용하여 3차원 공간 격자계를 구성하는 방법을 개발하였다. 2차원에서 사용되던 Sorenson 방법을 3차원으로 확장하여 격자계의 분포 및 교차 각도를 지정하는 함수를 정의하게 하였다. 미분방정식의 해는 weighting function scheme과 modified strongly implicit procedure를 사용하여 구하였고, 3차원 내부 격자계와 경계면과의 매끄러운 연결을 위해 trans-finite interpolation을 이용하였다. 적용예로서 컨테이너 운반선과 대형 유조선 주위의 난류유동 계산을 위한 공간 격자계를 보였다.

#### Abstract

To predict the viscous boundary layers and wakes around a ship, the CFD techniques are commonly used. For the efficient application of CFD tools to practical hull forms, a 3-D field grid generating system is developed. The present grid generating system utilizes the solution of Poisson equation. Sorenson's method developed for 2-D is extended into 3-D to provide the forcing functions controlling grid interval and orthogonality on hull surface, etc. The weighting function scheme is used for the discretization of the Poisson equation and the linear equations are solved by using MSIP solver. The trans-finite interpolation is also employed to assure the smooth transition into boundary surface grids. To prove the applicability, the field grid systems around a container ship and a VLCC with bow and stern bulb are illustrated, and the procedures for generating 3-D field grid system are explained.

접수일자: 1998년 8월 22일, 재접수일자: 1998년 11월 16일

\* 정회원, 선박해양공학연구센터 선박성능연구부

## 1. 서 언

공학적인 관심이 있는 대부분의 유체유동은 난류현상을 동반한 점성유동이라고 할 수 있다. 이러한 유동의 정확한 해석을 위해서는 현재 여러 분야에서 활용되고 있는 계산유체역학(CFD)의 기법을 이용할 수 있다. 이를 위해서는 우선 유동을 효과적으로 모사할 수 있는 좋은 풀개가 필요하다. 하지만 이에 못지 않게 중요한 것은 계산의 대상인 물체 및 주위의 유동장을 잘 나타낼 수 있는 적절히 분포된 격자계의 구성이라고 할 수 있다. 대부분의 풀개들이 격자계의 형상이나 직교도등 여러 가지 격자계의 특성에 따라 해의 정확도 및 수렴도에 지대한 영향을 받기 때문에 난류유동의 계산에 적합한 격자계를 제공하는 일은 풀개의 개발만큼이나 중요하다고 할 수 있다.

본 연구의 관심인 선체 주위의 유동에 국한하여 생각해 보면, 우선 선체의 형상을 표현하는 오프셋을 이용하여 선체 표면 격자계가 구성되고 이를 바탕으로 점성유동 계산을 위한 3차원 공간 격자계를 생성하게 되는데, 이 과정이 빠르고 쉽고 효과적일수록 사용의 빈도를 높이고 전체 계산 시스템의 효율성을 개선할 수 있다. 이러한 전처리 과정(pre-processing)의 중요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않는다고 하겠다.

본 논문에서는 선체 주위의 난류유동 계산에 쓰일 수 있는 3차원 공간 격자계를 대수학적인 방법과 타원형 편미분 방정식의 해를 이용하여 구하는 방법을 각각 기술하고 실제의 응용 예를 보였다. 특히 두 방법을 혼용하여 각 방법의 단점을 극복하고 한 방법만으로는 표현하기 힘들었던 실용적인 선체 주위의 난류 계산용 격자계를 구성하는 방법을 소개하였다. 이러한 방법을 이용하여 구성된 3차원 격자 생성 시스템은 공학용 workstation을 이용하면 10분 정도에 선체 주위의 점성유동 계산에 필요한 격자계를 구성할 수 있다. 본 논문에서는 O-O형의 격자 구조를 채택하였으나 H-O형이나 C-O형의 격자 구조에서도 똑같이 적용될 수 있다. 다음에는 격자계 구성에 필요한 제반 방법과 부수되는 수학적인 수단들을 기술하

고 있다.

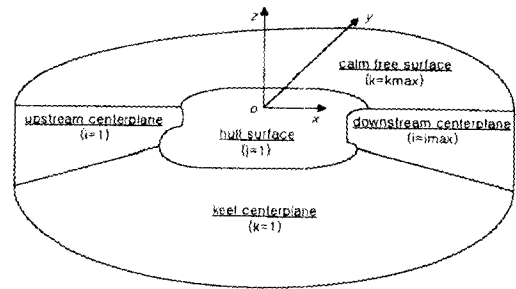


Fig. 1 Schematics of grid system with O-O topology

## 2. 격자계의 기하학적인 특징

지금까지 대부분의 선체 주위의 점성유동 계산을 위한 격자계의 특징은 비교적 생성하기 쉬운 일정한 종방향 위치( $x=\text{constant plane}$ )에서 생성된 평면 격자계를 종방향으로 연결하여 구성하였다. 그러나 이러한 격자계는 선체 표면을 따라서 발생하는 난류 현상을 정확히 모사하는 데는 한계를 가지고 있다. 왜냐하면 통상 난류유동을 계산하는 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식은 난류 모형과 벽함수등을 이용하여야 하는데, 이들 모두 벽면(선체 표면)으로부터의 정확한 거리를 필요로 하기 때문이다. 그리고 압력 등의 유동 특성을 나타내는 물리량들도 종방향 좌표가 일정한 평면을 따라 변화하기보다는 선수나 선미부의 물체 형상을 따라 급격히 변화하기 때문에 유동의 변화를 보다 정확하게 모사하기 위해서는 격자계가 선수 및 선미의 형태를 따라서 구성되는 것이 매우 유리하다고 할 수 있다. 이를 위해서는 일정한 단면에서 생성된 격자계(이하 X-O형)에서와는 달리, 선체를 하나의 블록으로 하는 선체표면 격자계가 필요하다. 이를 위해서 다른 논문에서 기술한 선체 표면 격자계 생성 기법[1]을 이용할 수 있고, 본 연구에서는 이러한 이미 제공된 선체 표면 격자계를 이용하여 O-O형의 기하학적인 특징을 가지는 3차원 격자계를 생성하는 방법을 기술하려고 한다.

Fig. 1에 보인 바와 같이 우선 O-O형 격자계의 여섯 경계면을 결정하여야 하는데, 이는 선수 상

류의 중앙면, 선미 하류의 중앙면, 바닥 중앙면, 정수면, 선체 표면, 그리고 바깥면으로 이루어졌다. 이 중에서 선체표면 격자계는 이미 주어졌다고 하고, 바깥면에서는 간단한 수학적 수단을 이용하여 형성된 사분구(四分球)위에 횡방향으로는 등간격, 그리고 종방향으로는 미리 정해진 일정한 비율로 격자를 분포시킴으로써 대수적으로 결정된 격자계를 사용한다. 그러나 나머지 네 개의 경계면의 경우에는 선수나 선미 등의 복잡한 형상을 안고 있으므로 부드럽고 효과적인 격자계 구성을 위해 2차원 Poisson 방정식의 해를 이용하였다. 또한 이러한 2차원 Poisson 방정식의 경계 조건으로는 1차원 Poisson 방정식의 해를 사용하는 등 일관성을 유지하였다. Poisson 방정식의 형태와 해법 그리고 격자계 조절 함수 등은 다음에 자세히 다루고 있다.

이렇게 하여 여섯 경계면의 격자계가 구성된 다음에는 3차원 공간 격자계를 구성하는데, 우선 쉽게 생각할 수 있는 방법은 대수학적인(algebraic) 방법이다. 가장 대표적인 대수학적인 방법은 trans-finite interpolation(이하 TFI)인데, 격자계의 특성상 경계면에서의 길이비가 내부 영역의 격자계에서도 보존되게 하여야 한다. TFI는 매우 효과적이고 안전한 격자계 생성법이기는 하나 선체 표면에서의 교차각도를 조절할 수 없다. 자세한 TFI의 내용은 다음절에 설명하였다.

그리고 약간 복잡하기는 하나, 3차원 Poisson 방정식의 해를 구하여 선체 표면에서의 교차 각도를 임의로 지정할 수 있을 뿐아니라 부드러운 내부 격자계를 구하는 방법을 이용할 수 있다. 이 경우, 내부 격자계가 경계면 격자계와 매끄럽지 못하게 연결될 수 있으므로 이를 개선하고자 3차원 Poisson 방정식의 해와 TFI에 의해 얻어진 해를 적당히 섞어서 사용상의 편의를 추구하였다.

### 3. Trans-Finite Interpolation(TFI)을 이용한 대수학적인 방법

Trans-finite interpolation은 경계에서의 조건들을 이용하여 내부의 값을 결정하는 대수학적인 방

법으로서 경계에서의 값이 내부 영역으로 매끄럽게 연결되고 최대값이나 최소값이 영역의 내부에 생기지 않기 때문에 격자계를 구성하는데 있어서 매우 유용한 방법이라고 할 수 있으며, 실제로 사용되고 있는 대수학적인 격자계 생성방법의 대부분을 차지하고 있다. 그러나 경계면끼리의 직교도가 우수하고 각 경계면의 길이가 비슷하면 내부 격자계 또한 우수하지만, 그렇지 않은 경우 경계면 근처에서의 직교성이 보장되지 않을 뿐 아니라 간격의 조절이 쉽지 않기 때문에 선수나 선미와 같이 복잡한 형상에는 적합하지 않은 점이 있다. 다음에는 격자계 구성에 쉽게 사용할 수 있는 경계면에서의 길이비가 내부 영역 안에서도 보존되는 blending function을 이용한 2차원 TFI[2]에 대하여 설명한 후, 이를 3차원으로 확장하기로 한다.

#### 3.1 2차원 Trans-Finite Interpolation

우선 2차원 영역 안의 점  $\vec{R}(i, j)$ 의 좌표를  $(x, y)$ 라고 하고  $1 \leq i \leq imax$ , 그리고  $1 \leq j \leq jmax$ 라 하면, 2차원 TFI는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{R}(i, j) = & \vec{R}(1, j)[1 - s(i, j)] + \vec{R}(imax, j)s(i, j) \\ & + \vec{R}(i, 1)[1 - t(i, j)] + \vec{R}(i, jmax)t(i, j) \\ & - \vec{R}(1, 1)[1 - s(i, j)][1 - t(i, j)] \\ & - \vec{R}(imax, 1)s(i, j)[1 - t(i, j)] \quad (1) \\ & - \vec{R}(1, jmax)[1 - s(i, j)]t(i, j) \\ & - \vec{R}(imax, jmax)s(i, j)t(i, j) \end{aligned}$$

그리고  $s(i, j)$  와  $t(i, j)$ 는 각각  $i$  와  $j$  방향의 blending function으로서 경계에서의 정보가 그 방향으로 전파되는 비율을 나타낸다. TFI는 이러한  $s$  와  $t$  를 어떻게 정의하는가에 따라 내부의 값의 분포가 결정되는 것이다. 위 식을 다시 쓰면,

$$\vec{R}(i, j) = \vec{F}_1(i, j) + \vec{F}_2(i, j) \quad (2)$$

로 쓸 수 있고, 여기서  $\vec{F}_1$  과  $\vec{F}_2$  는 각각 다음

과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_1 &= \bar{R}(1, j)[1 - s(i, j)] + \bar{R}(imax, j)s(i, j) \\ \bar{F}_2 &= \{ \bar{R}(i, 1) - \bar{F}_1(i, 1) \} [1 - t(i, j)] \\ &\quad + \{ \bar{R}(i, jmax) - \bar{F}_1(i, jmax) \} t(i, j) \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 blending function  $s(i, j)$  와  $t(i, j)$ 는 각각  $0 \leq s \leq 1, 0 \leq t \leq 1$ 의 값을 가지는데,  $s(1, j) = 0, s(imax, j) = 1$  그리고  $t(i, 1) = 0, t(i, jmax) = 1$ 의 경계값을 가지며 변한다. 이 때, 이 값의 변화에 따라 내부 영역의 격자계의 간격이 정해진다. 가장 먼저 생각할 수 있는 blending function은 격자계의 index를 이용한 비인데,  $s_o(i, j) = \frac{(i-1)}{(imax-1)}$ 와 같이 균등한 지수비(index ratio)를 사용할 수도 있다. 하지만 이와 같은 방법은 통상 난류유동의 계산을 염두에 두고 생성되는 격자계의 경계에서의 밀집(clustering)을 내부의 영역에서 유지할 수 없다. 그러므로 경계에서의 길이 비를 내부에서도 유지할 수 있기 위해서 blending function을 2차원적인 분포로 생각하여 다음과 같이 내삽한다. 즉, 이는 2차원 blending function을 1차원 TFI로 구한다는 뜻이다[2]. 여기서 1차원 TFI는 선형 내삽임을 상기해 둔다. 이를 식으로 쓰면,

$$s(i, j) = s(i, 1) + [s(i, jmax) - s(i, 1)]t(i, j) \quad (4)$$

$$t(i, j) = t(1, j) + [t(imax, j) - t(1, j)]s(i, j) \quad (5)$$

로부터

$$s(i, j) = \frac{s(i, 1) + [s(i, jmax) - s(i, 1)]t(1, j)}{1 - [s(i, jmax) - s(i, 1)][t(imax, j) - t(1, j)]}$$

$$t(i, j) = \frac{t(1, j) + [t(imax, j) - t(1, j)]s(i, 1)}{1 - [s(i, jmax) - s(i, 1)][t(imax, j) - t(1, j)]}$$

가 얻어진다. 경계에서의 값들이 모두 주어진 2차원 영역에서 (5)에 주어진 2차원 blending function들을 사용하여 (2)와 (3)의 TFI를 이용하면 내부 영역의 격자점들은 경계에서 주어진 격자의 간격을 유지하게 된다. 이러한 2차원 TFI의 개념을 3차원으로 확장하면 다음에 보인 바와 같이 공간 격자계 구성에 쉽게 적용할 수 있는 3차

원 TFI를 유도해낼 수 있다.

### 3.2 3차원 Trans-Finite Interpolation

앞 절에서 기술한 2차원의 경우와 마찬가지로 3차원 TFI는 식으로 쓰면,

$$\begin{aligned} \bar{R}(i, j, k) &= \bar{F}_1(i, j, k) \\ &\quad + \bar{F}_2(i, j, k) + \bar{F}_3(i, j, k) \end{aligned} \quad (6)$$

라 쓸 수 있고, 여기서  $\bar{F}_1$  과  $\bar{F}_2$  그리고  $\bar{F}_3$ 는 각각

$$\bar{F}_1 = \bar{R}(1, j, k)[1 - s(i, j, k)] + \bar{R}(imax, j, k)s(i, j, k) \quad (7)$$

$$\bar{F}_2 = \{ \bar{R}(i, 1, k) - \bar{F}_1(i, 1, k) \} [1 - t(i, j, k)] + \{ \bar{R}(i, jmax, k) - \bar{F}_1(i, jmax, k) \} t(i, j, k)$$

$$\begin{aligned} \bar{F}_3 &= \{ \bar{R}(i, j, 1) - \bar{F}_1(i, j, 1) \\ &\quad - \bar{F}_2(i, j, 1) \} [1 - u(i, j, k)] \\ &\quad + \{ \bar{R}(i, j, kmax) - \bar{F}_1(i, j, kmax) \\ &\quad - \bar{F}_2(i, j, kmax) \} u(i, j, k) \end{aligned}$$

로 정의된다. 앞서 기술한대로 2차원의 경우에는 blending function을 2차원 함수로 생각하고 각각의 점에서의 값을 1차원 TFI를 이용하여 구하였다. 3차원의 경우에는 blending function ( $s, t, u$ )를 3차원 함수로 정의하는데, 내부 영역의 각 점에서의 값을 구하기 위해 각각의 경계면에서 얻어진 blending function의 값을 가지고 2차원 TFI를 적용하여 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} s(i, j, k) &= s(i, 1, k)[1 - t(i, j, k)] \\ &\quad + s(i, jmax, k)t(i, j, k) \\ &\quad + s(i, j, 1)[1 - u(i, j, k)] \\ &\quad + s(i, j, kmax)u(i, j, k) \\ &\quad - s(i, 1, 1)[1 - t(i, j, k)][1 - u(i, j, k)] \\ &\quad - s(i, jmax, 1)t(i, j, k)[1 - u(i, j, k)] \\ &\quad - s(i, 1, kmax)[1 - t(i, j, k)]u(i, j, k) \\ &\quad - s(i, jmax, kmax)t(i, j, k)u(i, j, k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t(i, j, k) &= t(i, j, 1)[1 - u(i, j, k)] \\ &\quad + t(i, j, kmax)u(i, j, k) \\ &\quad + t(1, j, k)[1 - s(i, j, k)] \\ &\quad + t(imax, j, k)s(i, j, k) \\ &\quad - t(1, j, 1)[1 - u(i, j, k)][1 - s(i, j, k)] \\ &\quad - t(1, j, kmax)u(i, j, k)[1 - s(i, j, k)] \\ &\quad - t(imax, j, 1)[1 - u(i, j, k)]s(i, j, k) \\ &\quad - t(imax, j, kmax)u(i, j, k)s(i, j, k) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 u(i, j, k) = & u(1, j, k)[1 - s(i, j, k)] \\
 & + u(imax, j, k)s(i, j, k) \\
 & + u(i, 1, k)[1 - t(i, j, k)] \\
 & + u(i, jmax, k)t(i, j, k) \\
 & - u(1, 1, k)[1 - s(i, j, k)][1 - t(i, j, k)] \\
 & - u(imax, 1, k)s(i, j, k)[1 - t(i, j, k)] \\
 & - u(1, jmax, k)[1 - s(i, j, k)]t(i, j, k) \\
 & - u(imax, jmax, k)s(i, j, k)t(i, j, k)
 \end{aligned}$$

여기서  $s(i, j, k)$ ,  $t(i, j, k)$  와  $u(i, j, k)$ 는 각각  $(i, j, k)$ 방향의 blending function이고, 위의 세 식은  $(s, t, u)$ 에 관한 비선형 3원 연립방정식이다.

하지만, 초기값을  $s_0(i, j, k) = \frac{(i-1)}{(imax-1)}$  와 같이

하여 반복해서 계산하면 5번 이내에 충분히 수렴된 해를 구할 수 있다. 각각의 점에서 수렴된 blending function의 값은 해당되는 내부의 격자점을 구하는데 사용된다.

이때, 경계면에서의 값들은 미리 해당 방향의 index를 따라 계산해 놓아야 하는데, 예를 들면,  $s(i, 1, k)$ 의 경우는  $j=1$ 인  $(i, k)$ 로 이루어진 경계면에서 일정한  $k$  로 이루어진 곡선을 따라  $i$ 가 증가하는 방향으로의 적분된 길이 비이고,  $t(i, j, k)$ 는  $i=1$ 인  $(j, k)$ 로 이루어진 경계면에서 일정한  $k$  로 이루어진 곡선을 따라  $j$ 가 증가하는 방향으로의 적분된 길이 비이며,  $u(1, j, k)$ 의 경우는  $i=1$ 인 경계면에서 주어진  $j$ 를 따라  $k$ 가 증가하는 방향으로의 적분된 길이 비를 가리킨다. 이렇게 각 경계면에서의 길이비가 주어지고 (8)로 주어지는 blending function  $(s, t, u)$ 의 값이 모든 내부의 점  $(i, j, k)$ 에서 결정되면, (6)과 (7)식을 이용하여 길이비가 내부의 영역에서도 보존되는 3차원 TFI를 적용할 수 있다.

#### 4. 타원형 미분 방정식(Poisson equation)의 해를 이용한 방법

##### 4.1 Poisson 방정식

계산유체역학(CFD)에서 개발된 여러 가지의 효과적인 기법들을 적용하기 위해서는 격자계의 구성이 반드시 선행되어야 하는데, 현재 세계적으로 가장 널리 쓰이는 방법은 타원형 미분 방정식의

해를 이용하는 방법이다. 가끔 포물선형이나 쌍곡선형의 미분 방정식이 쓰이기도 하지만 대부분의 경우 다음과 같은 Poisson 방정식이 쓰이는데, 우변의 항이 격자계의 간격과 교차 각도 등을 결정해 주는 격자계 조절 함수(forcing function)이다.

본래 영역의 Cartesian 좌표계를  $(x, y, z)$ , 그리고 격자계의 지수(index)로 이루어진 변환된 균일 좌표계를  $(\xi, \eta, \zeta)$ 라 하면, 풀고자하는 방정식은

$$\nabla^2 \xi = f^1, \nabla^2 \eta = f^2, \nabla^2 \zeta = f^3 \tag{9}$$

으로서, 위와 같은 편미분 방정식은  $(x, y, z)$ 에 관한 편미분으로 이루어져 있으므로 풀기가 어렵다. 이를 [3]에서와 같이 독립변수와 종속변수를 각각 교환하여 정리하면,

$$\begin{aligned}
 g^{11}x_{\xi\xi}^i + g^{22}x_{\eta\eta}^i + g^{33}x_{\zeta\zeta}^i + 2g^{12}x_{\xi\eta}^i + 2g^{13}x_{\xi\zeta}^i + 2g^{23}x_{\eta\zeta}^i \\
 + f^1x_{\xi}^i + f^2x_{\eta}^i + f^3x_{\zeta}^i = 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

가 되고,  $x^i$ 는  $i=1, 2, 3$  일 때 각각  $(x, y, z)$ 를 나타낸다. 그리고 metric coefficient, 즉  $g^{ij}$  등은 contravariant base vector의 내적(dot product)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$g^{ij} = \hat{a}^i \cdot \hat{a}^j = \xi_x^i \xi_x^j + \xi_y^i \xi_y^j + \xi_z^i \xi_z^j$$

그리고 여기에서  $\hat{a}^i$ 는

$$\hat{a}^i = \nabla \xi^i = (\xi_x^i, \xi_y^i, \xi_z^i)$$

로 정의되고,  $\xi^i$  방향의 contravariant base vector로서 일정한  $\xi^i$  로 이루어진 면에 직각인 방향을 가지고 있다. 한편 위의  $\hat{a}^i$  와 역의 관계를 가지고 있는  $\hat{a}_i$  는 covariant base vector로서

$$\hat{a}_i = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial \xi^i} = (x_{\xi^i}, y_{\xi^i}, z_{\xi^i})$$

로 정의되는데  $\xi^i$  의 증가 방향과 동일한 방향을 가지고 있다. 이 두 base vector는 변환된 좌표계의 reciprocal basis를 이룬다. 즉,  $\hat{a}^i \cdot \hat{a}_j = \delta_j^i$ 가 된다. 이때  $\delta_j^i$  은  $i$  와  $j$  가 같으면 1, 다른면 0 인 Kronecker delta 함수이다. 그리고 covariant metric coefficient  $g_{ij}$  는

$$g_{ij} = \hat{a}_i \cdot \hat{a}_j = x_{\xi^i} x_{\xi^j} + y_{\xi^i} y_{\xi^j} + z_{\xi^i} z_{\xi^j}$$

로 정의된다. 어떠한 방법으로든지 격자계가 정의되었다고 할 때, covariant base vector는 쉽게 계산할 수 있는 반면, contravariant base vector는 변환된 좌표계에서 계산되지 않고 covariant base vector의 inverse vector로써 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial \xi^i}{\partial x^l} = \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial x^m}{\partial \xi^j} \frac{\partial x^n}{\partial \xi^k} - \frac{\partial x^n}{\partial \xi^k} \frac{\partial x^m}{\partial \xi^j} \right\} \quad (11)$$

, where  $(i, j, k), (l, m, n)$  are cyclic.

그리고 좌표 변환의 Jacobian 은

$$J = \begin{vmatrix} x_\xi & x_\eta & x_\zeta \\ y_\xi & y_\eta & y_\zeta \\ z_\xi & z_\eta & z_\zeta \end{vmatrix}$$

로 정의된다.

#### 4.2 이산화

식(10)을 이용하여 Poisson 방정식을 풀기 위해서는 적당히 방정식을 이산화 하여야 하는데, 본 연구에서는 weighting function scheme[4]을 이용하였다. 통상 격자계 구성을 위한 Poisson 방정식의 이산화에서는 흔히 central difference scheme 이 사용되는데, 초기 조건이 좋지 못하고 격자계의 분포가 불균일 해지면 종종 반복 계산 중에 불안정성이 발생하여 수렴해를 얻을 수 없는 경우가 있다. 이러한 불안정성을 방지하고 방정식의 반복 계산에서의 수렴도를 좋게 하고, 설령 초기치가 좋지 못해도 수렴할 수 있도록 튼튼한 weighting function scheme이 채택되었다. Fig. 2에는 이산화하는데 필요한 각 방향의 격자 구조를 보이고 있고, 또한 각 node의 이름을 보여주고 있다. Weighting function scheme의 경우, 한 평면 ( $\xi^i = constant$ )에서 9개의 node가 연결되어 3차원인 경우 19 point-stencil을 이루고 있다. 이렇게 (10)식의 Poisson 방정식을 이산화(discretization)된 대수 방정식으로 써보면,

$$\begin{aligned} & C_{WC} \phi_{i-1,j,k} + C_{EC} \phi_{i+1,j,k} \\ & + C_{SC} \phi_{i,j-1,k} + C_{NC} \phi_{i,j+1,k} \\ & + C_{BC} \phi_{i,j,k-1} + C_{TC} \phi_{i,j,k+1} \\ & + C_{SW} \phi_{i-1,j-1,k} + C_{NW} \phi_{i-1,j+1,k} \\ & + C_{SE} \phi_{i+1,j-1,k} + C_{NE} \phi_{i+1,j+1,k} \\ & + C_{BS} \phi_{i,j-1,k-1} + C_{BN} \phi_{i,j+1,k-1} \\ & + C_{TS} \phi_{i,j-1,k+1} + C_{TN} \phi_{i,j+1,k+1} \\ & + C_{BW} \phi_{i-1,j,k-1} + C_{BE} \phi_{i+1,j,k-1} \\ & + C_{TW} \phi_{i-1,j,k+1} + C_{TE} \phi_{i+1,j,k+1} \\ & + C_{PP} \phi_{i,j,k} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

인데,  $\phi$  는  $(x, y, z)$  중 하나를 나타낸다. 그리고 각각의 node의 이름은 Fig. 2에서와 같이 East( $i+1$ ), West( $i-1$ ), North( $j+1$ ), South( $j-1$ ), Top( $k+1$ ), Bottom( $k-1$ )을 각각 의미하고 있고, 각 node에서의 계수  $C_{NB}$  ( $NB=EC, SE$  etc.)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{WC} &= g^{11} W_f \left( -\frac{f^1}{g^{11}} \right), & C_{EC} &= g^{11} W_f \left( \frac{f^1}{g^{11}} \right), \\ C_{SC} &= g^{22} W_f \left( -\frac{f^2}{g^{22}} \right), & C_{NC} &= g^{22} W_f \left( \frac{f^2}{g^{22}} \right), \\ C_{BC} &= g^{33} W_f \left( -\frac{f^3}{g^{33}} \right), & C_{TC} &= g^{33} W_f \left( \frac{f^3}{g^{33}} \right), \\ C_{PP} &= -C_{WC} - C_{EC} - C_{SC} - C_{NC} - C_{BC} - C_{TC}, \\ C_{SW} &= 2g^{12} W_f^* \left( \frac{f^1}{g^{11}} \right) W_f^* \left( \frac{f^2}{g^{22}} \right) = C_{NE}, \\ C_{SE} &= C_{NW} = -C_{SW}, \\ C_{BW} &= 2g^{13} W_f^* \left( \frac{f^1}{g^{11}} \right) W_f^* \left( \frac{f^3}{g^{33}} \right) = C_{TE}, \\ C_{BE} &= C_{TW} = -C_{BW}, \\ C_{BS} &= 2g^{23} W_f^* \left( \frac{f^2}{g^{22}} \right) W_f^* \left( \frac{f^3}{g^{33}} \right) = C_{TN}, \\ C_{BN} &= C_{TS} = -C_{BS} \end{aligned} \quad (13)$$

그리고, weighting function  $W_f, W_f^*$  은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} W_f(Z) &= \frac{Z}{[1 - \exp(-Z)]} \\ &\approx \max[0, (1 - 0.1|Z|)^5] + \max[0, Z] \\ W_f^*(Z) &= \frac{Z}{[\exp(Z) - \exp(-Z)]} \\ &\approx (2 + 0.3332 Z^2 + 0.0172 Z^4)^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

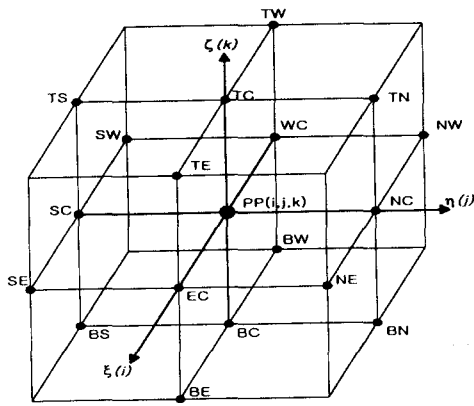


Fig. 2 Node definition for Poisson equation solution

위의 (12)식과 같이 이산화된 Poisson방정식은 이미 대수방정식으로 치환되었으므로 선형 다원 연립방정식의 해법을 이용하여 풀 수 있다. 19점의 정보를 가지는 선형 방정식으로서 가장 쉽게는 Point-Jacobi나 Point-SOR 또는 Tridiagonal matrix(TDMA)를 교대로 푸는 line-by-line형태의 해법이 가능하다. 그리고 보다 수렴도가 빠른 발전된 형태의 해법으로는 Strongly-Implicit Procedure(SIP)이나 Conjugate-Gradient method 또는 Multi-Grid method등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 사용이 간편하면서도 수렴도가 빠르다고 알려져 있는 Modified Strongly Implicit Procedure(MSIP)[5]을 이용하였다.

4.3 격자계 조절 함수

모든 경계면에서의 경계 조건이 주어지고 격자계 조절 함수  $f^1, f^2, f^3$  가 모든 내부의 점에서 주어지면 이산화된 방정식을 이용하여 얻어진 선형 방정식의 해를 얻으면 원하는 3차원 공간 격자계를 생성하게 된다. 그러나 아직도 Poisson 방정식의 우항인 격자계 조절 함수를 어떻게 정의할 것인가 하는 문제가 남아있다. 격자계 조절 함수를 어떻게 정의하는가에 따라 타원형 격자계 생성(elliptic grid generation)기법이 크게 달라지며 격자계의 특성과 정도가 결정된다. 여기에서는 2차원에서 폭넓게 쓰이는 Sorenson의 방법[6]을 3차

원으로 확장하여 사용하였다.

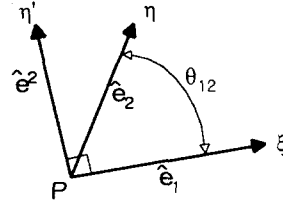


Fig. 3 Coordinate transformation in two dimension

4.3.1 2차원 격자계 조절 함수

우선 2차원의 경우를 살펴보면, 변환된 좌표를  $(\xi, \eta)$ 라고 하고  $\eta$  축방향으로 첫 번째 격자의 간격과 각도, 즉 위치를 경계 조건으로 제공한다고 가정한다. Fig. 3의 점 P에서의 국부 좌표계를 생각하면,  $\xi$ -축 방향의 단위 길이의 벡터  $\hat{e}_1$  은

$$\hat{e}_1 = \frac{\hat{a}_1}{|\hat{a}_1|} = \frac{(x_\xi, y_\xi)}{\sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}}$$

로 정의된다. 마찬가지로  $\eta$ -축 방향의 단위 길이의 벡터  $\hat{e}_2$  은

$$\hat{e}_2 = \frac{\hat{a}_2}{|\hat{a}_2|} = \frac{(x_\eta, y_\eta)}{\sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}}$$

가 된다. 한편, 격자계의 경계에서 주어지는 조건은 경계점뿐만 아니라 첫 번째 격자점의 간격, 즉  $s_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$  와  $\eta$  축의  $\xi$  축과의 교차각도  $\theta_{12}$  (단,  $0 < \theta_{12} < \pi$ ) 가 주어진다.

여기서  $\xi$  축을 따라서 주어진 경계의 점들로부터  $\hat{e}_1$  은 구해지고, 첫 번째 간격  $s_\eta$  와 각도  $\theta_{12}$  과 벡터의 회전을 이용하면  $\hat{e}_2$  는  $\hat{e}_1$  을  $\theta_{12}$  만큼 회전시킨 단위 벡터이므로,

$$\hat{e}_2 = \frac{(x_\xi \cos \theta_{12} - y_\xi \sin \theta_{12}, x_\xi \sin \theta_{12} + y_\xi \cos \theta_{12})}{\sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}}$$

로 얻어진다. 그로부터 경계 조건은

$$(x_\eta, y_\eta)_1 = \frac{s_\eta}{\sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}} (x_\xi \cos \theta_{12} - y_\xi \sin \theta_{12}, x_\xi \sin \theta_{12} + y_\xi \cos \theta_{12}) \quad (15)$$

가 되고 이중에서  $\theta_{12}$  가  $\frac{\pi}{2}$  인 특별한 경우는 직교 조건으로

$$(x_\eta, y_\eta)_1 = \frac{s_\eta}{\sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}}(-y_\xi, x_\xi)$$

$$= s_\eta \hat{e}^2 = \frac{s_\eta}{\sqrt{g_{22}}}(\eta_x, \eta_y)$$

로도 쓸 수 있다. 이를 이용하여 격자계 조절 함수를 정의하려면 (10)식을 경계면에 적용하여 격자계 조절 함수의 경계값을 구하고 그 값을 이용하여 내부에서의 함수값을 구하면 된다. 식(10)을 경계에서의 값을 구하기 위해 다시 쓰면,

$$f^1 x_\xi + f^2 x_\eta = -g^{11} x_{\xi\xi} - 2g^{12} x_{\xi\eta} - g^{22} x_{\eta\eta} \quad (16)$$

$$f^1 y_\xi + f^2 y_\eta = -g^{11} y_{\xi\xi} - 2g^{12} y_{\xi\eta} - g^{22} y_{\eta\eta}$$

가 되고,  $f^1, f^2$  를  $\eta=1$  또는  $jmax$  인 경계에서 구하려면,  $x_\xi, y_\xi, x_{\xi\xi}, y_{\xi\xi}$  는 계산이 가능하고, 그리고 다른 항들은

$$(x_{\xi\eta})_1 = \frac{1}{2}[-3(x_\xi)_1 + 4(x_\xi)_2 - (x_\xi)_3]$$

$$(x_{\xi\eta})_{jmax} = \frac{1}{2}[3(x_\xi)_{jmax} - 4(x_\xi)_{jmax-1} + (x_\xi)_{jmax-2}]$$

$$(x_{\eta\eta})_1 = -3.5x_1 + 4x_2 - 0.5x_3 - 3(x_\eta)_1$$

$$(x_{\eta\eta})_{jmax} = -3.5x_{jmax} + 4x_{jmax-1} - 0.5x_{jmax-2} + 3(x_\eta)_{jmax}$$

으로 계산하여 (16)의 우항 및 계수가 정해지므로  $f^1$  과  $f^2$  에 대하여 풀면  $\eta=1$  과  $\eta=jmax$  에서의 값을 구할 수 있다.

Poisson 방정식을 풀기 위해서는 내부에서의  $f^1$  과  $f^2$  을 모두 정의하여야 하는데, 이를 위해서 경계에서의 값들을 다음과 같이 내삽하여 구한다.

$$f^1(i, j) = f^1(i, 1)[1 - (\frac{j-1}{jmax-1})^a] + f^1(i, jmax)[\frac{j-1}{jmax-1}]^b \quad (17)$$

$$f^2(i, j) = f^2(i, 1)[1 - (\frac{j-1}{jmax-1})^a] + f^2(i, jmax)[\frac{j-1}{jmax-1}]^b$$

만약  $\eta=1$  에서의 값만을 이용하는 경우에는

$$f^1(i, j) = f^1(i, 1) \exp[-a(\frac{j-1}{jmax-1})] \quad (18)$$

$$f^2(i, j) = f^2(i, 1) \exp[-b(\frac{j-1}{jmax-1})]$$

을 이용하기도 한다. 그러나 통상적으로 초기치가 좋지 못한 경우가 대부분이고 이럴 경우, 반복 계산 과정에서 경계에서의 격자계 조절 함수값을 반복 계산중에 under-relaxation하여야한다. 본 연구에서는 Sorenson의 제안대로 다음과 같은 방식의 under-relaxation을 수행하였다.

$$f_{new} = f_{old} + \text{sign}\{ \min[\omega_p |f - f_{old}|, f_{lim} \max(|f_{old}|, 1)], f - f_{old} \}$$

여기서  $f_{old}$  는 지난 번 반복 계산에서의 값이고,  $f$  는 현재 얻어진 Poisson 방정식의 해이고  $f_{new}$  는 새로운 값이다. 그리고  $\omega_p$  와  $f_{lim}$  은 relaxation parameter이다. (16)에서 얻어진 경계에서의 격자계 조절 함수의 값을 (17)이나 (18)을 사용하여 내부 영역에서 정의할 수 있다.

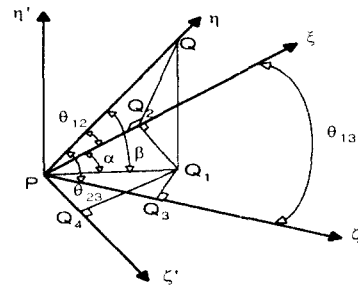


Fig. 4 Angle definition on boundary surface of three-dimensional grid system

#### 4.3.2 3차원 격자계 조절 함수

위와 같이 2차원에서 적용된 방법을 3차원으로 확장하려면 (15)와 같은 교차 각도를 이용하여  $(x_\eta, y_\eta, z_\eta)$ 을 경계 조건으로 하는  $f^1, f^2, f^3$  을 경계면에서 정의해 주어야 한다. 이를 위해서 우선, 3차원 격자계의 경계면에서 그 곡면내의 격자선 사이의 각도가 주어질 때, 그 곡면으로부



터 나가는 격자선의 각도를 이용하여야 한다. 우선  $\eta=1$ 인  $(\xi, 1, \zeta)$  면에서  $\xi$ -축과  $\zeta$ -축이 이루는 각도를  $\theta_{13}$  라고 하고,  $\eta$ -축이  $\xi$ -축, 그리고  $\zeta$ -축과 이루는 각도를 각각  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$  라고 하면, 선체 표면상의 한 점 P 근처의 국부 좌표계에서  $(\xi, \zeta)$ 는 선체 표면의 일부인 평면으로 생각될 수 있고, 그로부터 내부의 영역으로 뻗어나가는  $\eta$  축상의 한 점 Q를 생각하기로 한다.

선분  $\overline{PQ}$ 의 길이를  $r$ 이라고 하고 Q의  $(\xi, \zeta)$  면에 내린 수선의 발을  $Q_1$ 이라고 하자. 그리고 Fig. 4에 보인 바와 같이  $(\xi, \zeta)$  면에 직각인 좌표축  $\eta'$  (즉,  $\nabla\eta$ 의 방향)를 정의하고  $\xi$ 와  $\eta'$  축에 대한 제 3의 축을  $\zeta'$ 라고 하면  $(\xi, \eta', \zeta')$ 는 하나의 직교좌표계를 이룬다.  $Q_1$ 의  $\xi$ -축,  $\zeta$ -축, 그리고  $\zeta'$ -축에 대한 수선의 발을 각각  $Q_2$ ,  $Q_3$ , 그리고  $Q_4$ 라고 한다. 그러면  $\angle Q_2PQ_3$ 는  $\theta_{13}$ 으로서 선체표면 격자계가 주어지면 그에 따라서 계산되는 교차각이다. 그리고  $\angle QPQ_2$ 는  $\theta_{12}$ ,  $\angle QPQ_3$ 는  $\theta_{23}$ 로 경계에서의 조건으로 주어진다. 선분  $\overline{PQ_1}$ 의 길이를  $l$ 이라고 하고  $\angle QPQ_1$ 는  $\beta$ ,  $\angle Q_2PQ_1$ 는  $\alpha$ 라고 하면, 다음과 같은 기하학적인 관계가 성립된다.

$$l = r \cos \beta$$

$$l \cos \alpha = r \cos \theta_{12}$$

$$l \cos(\theta_{13} - \alpha) = r \cos \theta_{23}$$

이로부터

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\cos \theta_{12} \cos \theta_{13} + \cos \theta_{23}}{\cos \theta_{12} \sin \theta_{13}} \right\} \quad (19)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\cos \theta_{12}}{\cos \alpha} \right\}$$

의 관계를 얻을 수 있고, 이를 이용하여 점 Q에서의 국부 직교좌표계  $(\xi_Q, \eta_Q, \zeta_Q)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다. 편의상 선분  $\overline{PQ}$ 의 길이를  $r=1$ 이라고 하여  $\overline{PQ}$ 가  $\eta$ -축 방향의 단위 벡터  $\hat{e}_2$ 를 나타낸다고 하면,

$$\xi_Q = \cos \theta_{12} = l \cos \alpha$$

$$\eta_Q = \sin \beta \quad (20)$$

$$\zeta_Q = l \sin \alpha$$

의 관계를 얻을 수 있다.

한편, 이를 Cartesian 좌표계로 나타내기 위해서는 국부 직교좌표계  $(\xi, \eta', \zeta')$ 의  $(x, y, z)$ 에 대한 directional cosine을 알아야 한다. 이는 처음 좌표계를 구성하는 과정의 기본 벡터의 관계로부터 쉽게 얻어진다. 이를 수식으로 쓰면,

$$\hat{e}_\xi = \hat{e}_1 = (l_1, m_1, n_1) = \frac{(x_\xi, y_\xi, z_\xi)}{\sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2 + z_\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{g_{11}}} (x_\xi, y_\xi, z_\xi)$$

$$\hat{e}_\eta = \hat{e}^2 = (l_2, m_2, n_2) = \frac{(\eta_x, \eta_y, \eta_z)}{\sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}} = \frac{1}{\sqrt{g^{22}}} (\eta_x, \eta_y, \eta_z) \quad (21)$$

$$\hat{e}_{\zeta'} = \hat{e}_1 \times \hat{e}^2 = (l_3, m_3, n_3) = \frac{1}{\sqrt{g_{11}} \sqrt{g^{22}}} (y_\xi \eta_z - z_\xi \eta_y, z_\xi \eta_x - x_\xi \eta_z, x_\xi \eta_y - y_\xi \eta_x)$$

가 된다. 이를 이용하여 Cartesian 좌표계에서 선체 표면으로부터  $s_\eta$ 만큼 떨어져있고  $\xi$ -축과는  $\theta_{12}$ , 그리고  $\zeta$ -축과는  $\theta_{23}$ 의 각도를 이루는  $\eta$ -축상의 격자점의 선체 표면 격자점으로부터의 상대 좌표  $(x_\eta, y_\eta, z_\eta)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(x_\eta, y_\eta, z_\eta) = s_\eta \begin{pmatrix} [l_1 \xi_Q + l_2 \eta_Q + l_3 \zeta_Q], \\ [m_1 \xi_Q + m_2 \eta_Q + m_3 \zeta_Q], \\ [n_1 \xi_Q + n_2 \eta_Q + n_3 \zeta_Q] \end{pmatrix} \quad (22)$$

위와 같이 선체 표면에서 주어진 격자점의 거리와 교차 각도를 경계 조건으로 하는  $(x_\eta, y_\eta, z_\eta)$ 가 얻어지면 식(16)과 마찬가지로 경계면에서의 격자계 조절 함수의 값을 구하기 위하여

$$f^1 x_\xi + f^2 x_\eta + f^3 x_{\zeta'} = -g^{11} x_{\xi\xi} - g^{22} x_{\eta\eta} - g^{33} x_{\zeta'\zeta'} - 2g^{12} x_{\xi\eta} - 2g^{13} x_{\xi\zeta'} - 2g^{23} x_{\eta\zeta'}$$

$$f^1 y_\xi + f^2 y_\eta + f^3 y_\zeta = -g^{11} y_{\xi\xi} - g^{22} y_{\eta\eta} - g^{33} y_{\zeta\zeta} - 2g^{12} y_{\xi\eta} - 2g^{13} y_{\xi\zeta} - 2g^{23} y_{\eta\zeta}$$

$$f^1 z_\xi + f^2 z_\eta + f^3 z_\zeta = -g^{11} z_{\xi\xi} - g^{22} z_{\eta\eta} - g^{33} z_{\zeta\zeta} - 2g^{12} z_{\xi\eta} - 2g^{13} z_{\xi\zeta} - 2g^{23} z_{\eta\zeta}$$

의 3원 연립방정식을 풀어서  $f^1, f^2, f^3$  를  $\eta=1$  인 경계에서 구한다. 이때 각각의 편미분 항들은 2차원에서와 마찬가지로 구하면 된다. 만약  $\eta=jmax$  인 바깥 경계면에서의 값이 필요하다면 똑같은 방법으로 구한다. 3차원 Poisson 방정식을 풀기 위해서 모든 내부 영역에서의 격자계 조절 함수가 필요하므로 (17)이나 (18)에서와 마찬가지로 3차원에서도 내삽하여 구할 수 있다.

위와 같은 방법으로 결정된 격자계 조절 함수의 형태가 주어지면 4.2절의 이산화된 대수방정식의 해를 반복적으로 구하는 과정에서 격자계 조절 함수를 계속 수정하여 수렴된 해를 얻으면 Poisson 방정식의 해를 이용한 3차원 공간 격자계를 얻을 수 있다.

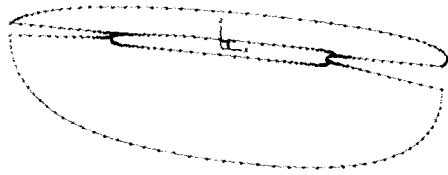


Fig.5 Boundary curves for two-dimensional boundary surfaces

5. 상선 주위의 공간 격자계 생성

앞에서 설명한 방법을 이용하여 실제적인 상선의 계산을 위한 격자계를 구성하기로 한다. 우선 주어진 선체 표면 격자계를 읽어들이고, 그로부터 네 구석점의 좌표를 구하여 2차원 경계면의 모서리를 이루는 네 직선을 구한다. 이 직선 위에 1차원적으로 점들을 분포해야 하는데, 우선 대수학적으로 적당한 분포된 점들을 초기값으로 하여 1차원 Poisson 방정식을 풀어서 점들의 배치를 결

정한다. 이 때의 1차원 격자계 조절 함수의 값은 2차원 때와 마찬가지로 첫 번째 격자계의 거리를 이용하여 구함으로써 2차원 Poisson 방정식의 경계로 사용될 때 부드럽게 전이되도록 하였다. 그리고 바깥 경계면을 이루는 두 개의 경계선은 parametric spline을 이용하여 얻어진 곡선 위에 미리 정해진 비율로 분포한다. 이렇게 얻어진 1차원 격자선들을 Fig. 5 에 보이고 있다.

위와 같이 구해진 1차원 경계선 위의 점들을 경계 조건으로 하여 각각의 2차원 Poisson 방정식을 풀어서 3차원 공간 격자계 구성을 위한 경계 조건으로 삼는다. 이때, 선수나 선미와 같이 급격한 변화를 가지는 영역에서의 2차원 Poisson 방정식의 경우에는 초기값이 좋지 않으면 반복 계산 중에서 발산할 수 있기 때문에 초기 값으로 2차원 TFI의 결과를 이용하는 등 주의가 필요하다. 3차원 공간 격자계 구성을 위한 2차원 경계면은 모두 6개인데, 이중 4개는 Poisson 방정식의 해로써 얻어지고, 선체 표면에서는 이미 격자면이 주어져있고 바깥 경계면은 대수학적으로 구성되었다. 이렇게 얻어진 격자 경계면을 Fig. 6에 보이고 있다.

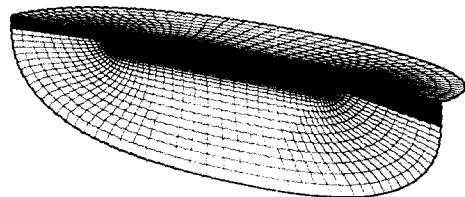


Fig. 6 Boundary surface grids for three-dimensional grid system

3차원 공간 격자계 구성을 위한 6개의 경계면에서의 격자점들이 모두 주어지면 3차원 Poisson 방정식을 풀어서 내부 영역에서의 격자계를 구하게 된다. 이때, 2차원 Poisson 방정식의 해로 얻어진 경계면과 3차원 Poisson 방정식의 해로 얻어진 공간 격자계는 경계면 근처에서 매끄럽게 연결되지 못한다. 이는 경계면 근처에서 선체 표면의 변화가 심하여 2차원적인 방법으로는 해결할 수 없기 때문이다. 이를 방지하고자 경계면 근처에서는 3

차원 TFI로 얻어진 대수학적인 격자점과 적절히 배합함으로써 부드럽게 연결되도록 배려하였다. 그리고  $\eta$ -방향의 두 번째 격자와 선체 표면과의 교차 각도는 3차원 TFI를 이용한 해에서의 교차 각도와 직각 사이의 일정한 비로 주어졌다. 이 경우는 그 비가 0이면 TFI에서의 각도이고 1.0이면 직각을 의미한다.

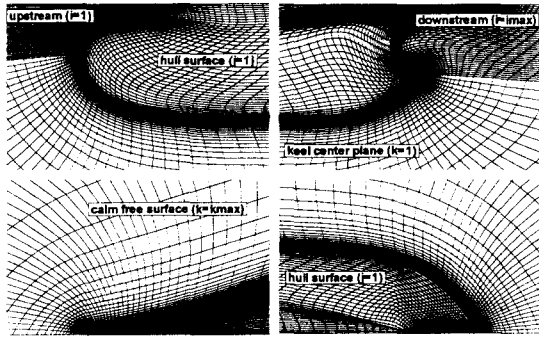


Fig. 7 Generated grids around a container ship

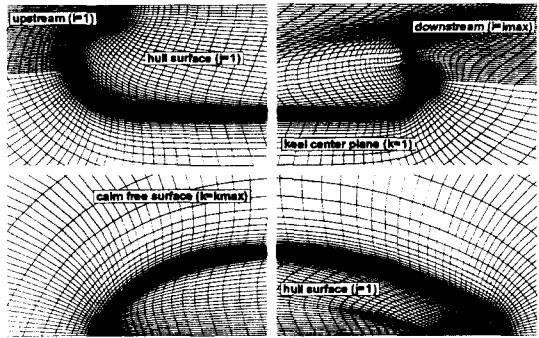


Fig. 8 Generated grids around a VLCC

다음에는 위에서 설명한 과정을 밝아서 얻어진 공간 격자계의 예를 보이고 있다. Fig. 7과 8에는 3600TEU 컨테이너선과 300K VLCC 주위의 점성 유동 계산에 필요한 3차원 공간 격자계로서 101x50x41의 격자가 각각  $\xi(i)$ ,  $\eta(j)$ , 그리고  $\zeta(k)$  방향으로 분포되었다. 그리고  $\eta$ -방향의 두 번째 격자는 선체 표면으로부터  $10^{-5}$ 의 거리에 위치하고, 교차 각도를 결정하는 3차원 TFI에서의 교차 각도와 직각 사이의 비는 0.9로 하였다. 얻

어진 3차원 격자계의 선체 표면과의 교차 각도는 평균  $84^\circ$ 로 매우 우수하였고, 공간상의 모든 점의 평균 교차 각도는  $72^\circ$ 이다. 이는 본 논문에서 채택한 Sorenson방법이 표면에서의 교차 각도를 조절하는 능력은 뛰어나지만 내부영역에서의 조절 능력은 다소 떨어질 뿐만 아니라, 대수적으로 정의된 선체 표면 격자계의 평균 교차 각도가  $67^\circ$ 인 사실에서 기인한다고 할 수 있다. 하지만 Fig. 7과 8에서 보이고 있는 격자계는 선수와 선미에 벌브가 달린 복잡한 실용 상선을 대상으로 하고 있음을 감안 할 때, 본 논문의 방법을 이용하여 생성된 공간 격자계의 질은 매우 좋다고 하겠다.

## 6. 결 언

선박의 점성저항 특성을 파악하고 추진기면에 유입되는 유동의 속도 분포를 알기 위해 선체주위의 난류유동 계산이 이루어지고 있다. 이를 보다 효과적으로 수행하기 위해 본 논문에서는 3차원 공간 격자계를 손쉽게 생성할 수 있는 방법을 개발하였다. 이를 위해서 타원형 편미분 방정식인 Poisson 방정식의 해와 trans-finite interpolation을 이용하였다. 타원형 미분 방정식의 해를 구하기 위해서는 weighting function scheme과 modified strongly implicit procedure가 이용되었고, 격자계 조절 함수는 Sorenson의 2차원 방법을 3차원으로 확장하여 구할 수 있게 하였다.

본 연구를 통해 개발된 3차원 공간 격자 생성 시스템은 선체표면 격자계가 주어졌을 때, 통상의 workstation을 이용하면 10분 정도에 선체 주위의 점성유동 계산에 필요한 격자계를 구성할 수 있으므로 계산유체역학 기법을 이용한 선체주위의 유동해석에 매우 유용하리라 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김우전, 반석호, "기본 오프셋을 이용한 상선의 선체표면 격자계 생성기법," 대한조선학회 논문집, 제35권 제1호, 1999. 2. 20
- [2] Kim, S. Y., A study on the flow around a

- strut mounted on the plate, Ph. D. Thesis, Hiroshima Univ. 1993.
- [3] Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A, Mastin, C.W, Numerical Grid Generation, Elsevier Science Publishing, 1985.
- [4] Hsu, K., Lee, S.L., "A numerical technique for two-dimensional grid generation with grid control at all of the boundaries," Journal of Comp. Physics, Vol. 96, pp. 451-469, 1991.
- [5] Schneider, G.E., Zedan, M., "A modified strongly implicit procedure for numerical solution of field problems," Numerical Heat Transfer, Vol. 4, pp. 1-19, 1981.
- [6] Sorenson, R.L., "A computer program to generate two-dimensional grids about airfoils and other shapes by the use of Poisson equation," NASA TM 81198, 1980.