

패널절단법 선체표면 패널생성을 위한 새로운 시도

최희종^{†*}, 김진^{*}, 반석호^{*}, 박일룡^{*}, 김광수^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}

Panel Cutting Method a New Approach in Hull Surface Panel Generation

Hee-Jong Choi^{†*}, Jin-Kim^{*}, Suak-Ho Van^{*}, Il-Ryong Park^{*} and Kwang-Soo Kim^{*}

Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{*}

Abstract

In this paper a new hull-panel generation algorithm named 'Panel Cutting Method' was developed to solve the flow phenomena around a ship advancing on the free surface with a constant speed. In this algorithm the non-linearity of the free surface boundary conditions was taken into account using the iterative method and the raised panel was used at each iteration step. Numerical calculations were performed to investigate the validity of the developed algorithm using the series 60($C_B=0.60$) hull. The wave resistance coefficients, the wave patterns and the wave heights were compared between the computed and the experimental results at $Fn=0.25$ and 0.316 . The comparison showed good agreement between computation and experiment.

※ Keywords: Potential flow(포텐셜유동), Panel cutting method(패널절단법), Nonlinear free surface boundary conditions(비선형자유수면경계조건), Series 60($C_B=0.60$) hull(계열 60 선박)

1. 서론

포텐셜이론을 사용하여 물체주위의 유동현상을 예측하고자하는 시도는 이미 19세기 후반부터 시도되었으며, 그 이후 일세기에 걸쳐 여러 공학 분야에 적용되어 왔으며, 그중에서도 조선

과 항공분야에서는 괄목할 만한 성과를 보여주었다. 특히 컴퓨터의 데이터 처리속도가 급속하게 향상된 20세기 후반에는 전산처리기법을 이용한 수치해석의 괄목할만한 발전으로 더욱 활발한 연구가 진행되고 있다.

포텐셜유동해석기법 중에서 선체주위의 유동해석에 광범위하게 사용되는 기법인 패널법은 1950년대 후반에 항공기 주위의 유동을 해석하기 위하여 개발되었으며, Hess and Smith(1962)는 패널

접수일: 2006년 8월 29일, 승인일: 2006년 11월 8일

† 교신저자: choihj@moeri.re.kr, 042-868-7266

법을 사용하여 3차원 물체 주위의 유동현상을 해석하는 기법을 제시하였다. 패널법이 선박유체역학분야에 적용된 것은 1970년대 후반으로 Dawson(1977)은 선형화된 자유수면 경계조건을 사용하여 유동현상을 해석하는 과정에서 방사조건을 효과적으로 만족시키기 위하여 속도포텐셜의 x-방향에 대한 2차의 미분항을 구할 때 4점 상류차분법을 사용할 것을 제안하였다. Ni(1987)와 Kim(1989)은 고차패널법을 사용하여 비선형 자유수면 경계조건을 엄밀하게 만족하는 수치해석기법을 제안하였으며, Xia(1986)와 Raven(1996)은 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 유동해석 시 안정된 해를 얻기 위하여 자유수면에 분포한 소오스 패널을 상 방향으로 일정거리만큼 이동할 것과 자유수면 경계조건이 적용되는 만족점을 일정거리만큼 상류방향으로 이동하여 수치해석을 수행할 것을 제안하였다.

패널법을 사용하여 선체주위의 유동과 조파저항을 올바르게 추정하기 위해서는 자유수면을 정의하는 패널의 분포도 중요하지만, 선체표면에 분포된 패널들이 얼마나 정확히 선형을 정의하고 있는가도 중요한 요소이다(김우전과 반석호 1999).

최근 선박의 고속화와 선박운항목적의 다변화로 인하여 선체표면상에 불연속선이 있는 복잡한 형상의 선형이나 선체가 과도한 트림과 침하량을 가지는 경우에 대해서도 유동해석을 수행해야 하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 이와 같은 선박에 대한 포텐셜유동해석 시 적절한 패널의 생성에 많은 어려움이 따른다. 특히 비선형 자유수면 경계조건을 만족시키기 위해서는 매 반복계산단계마다 이전단계에서 구하여진 선축파고를 따라서 선체표면에서의 패널을 다시 생성해 주어야 하는데, 이때 선체표면에 불연속선을 가지는 선박과 같이 복잡한 선체의 형상을 가지는 선박에 대하여서는 유동해석을 위한 계산패널의 생성에 많은 어려움이 있었다(김도현 등 2000).

이에 본 연구에서는 선형에 관계없이 초기에 선체표면을 정의하는 패널이 주어지면, 그 형상을 최대한 유지하면서 반복계산단계마다 쉽게 선축파고를 따라가면서 선체표면을 정의하는 패널 생성 기법을 개발하였으며, 이를 패널절단법(panel

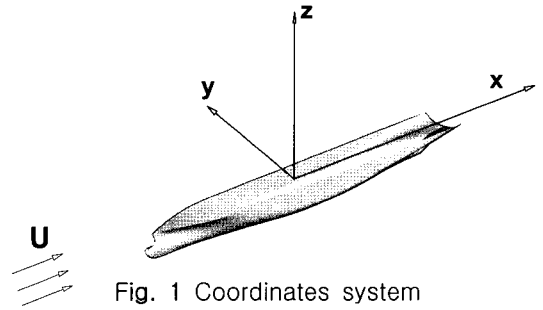


Fig. 1 Coordinates system

cutting method)라고 부르기로 한다. 그리고 개발된 수치해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 series 60($C_B=0.60$)선형에 대하여 수치해석을 수행하고 모형시험결과와 서로 비교하였다.

2. 문제의 정식화

2.1. 지배방정식과 경계조건

좌표계는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 선박의 중앙에 고정된 우수좌표계로 x-축은 선미, y-축은 우현, z-축은 위쪽을 양의 방향으로 정의하였다.

비정성, 비압축성 유체라고 가정하고 유동의 비회전성을 가정하면 속도포텐셜이 존재하며 유장 내에서 지배방정식인 라플라스 방정식과 경계면에서 경계조건식을 부과함으로써 구할 수 있다. 지배방정식인 라플라스 방정식(Laplace equation)은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in fluid domain} \quad (1)$$

선체표면에서의 유체입자는 비침투조건을 만족하여야 한다.

$$\phi_n = 0 \quad \text{on hull} \quad (2)$$

자유수면에서 유체입자는 자유수면을 떠날 수 없으며 자유수면과 같이 움직여야 한다는 운동학적 자유수면 경계조건식(kinematic free surface boundary condition)을 만족시켜야 한다.

$$\phi_x h_x + \phi_y h_y - \phi_z = 0 \quad \text{on free surface} \quad (3)$$

운동학적 자유수면 경계조건식과 더불어 자유수면에서 만족하여야 할 또 다른 경계조건으로 자유수면에서의 압력이 대기압과 같아야 한다는 동역학적 자유수면 경계조건식(dynamic free surface boundary condition)을 만족시켜야 한다.

$$h + \frac{1}{2}Fn^2(\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi - 1) = 0 \quad \text{on free surface} \quad (4)$$

마지막으로 선수부에서 상류방향으로 어느 정도 떨어진 자유수면 영역에서는 선체의 존재에 의하여 발생된 파가 없어야 한다는 조건인 방사조건을 만족시켜야 한다.

$$\nabla\Phi = (1, 0, 0) \text{ at } x = -\infty \quad (5)$$

2.2. 비선형 자유수면 경계조건식의 처리

자유수면 경계조건식을 선형이나 또는 비선형으로 만족시키기 위하여서는 우선 속도포텐셜과 파고를 다음과 같이 분해하여 선형화하는 과정을 거쳐야 한다.

$$\Phi = \Phi + \Phi' \quad (6)$$

$$h = H + h' \quad (7)$$

위 식에서 Φ 는 모유동속도포텐셜, Φ' 는 교란속도포텐셜, H 는 모파고 그리고 h' 는 교란파고를 의미한다. 여기서 교란속도포텐셜과 교란파고가 모유동속도포텐셜이나 모파고에 비하여 충분히 작다고 가정하고, 식(6)과 (7)를 식(3)과 (4)에 대입한 후 미소항의 고차항을 소거하면 다음과 같이 된다.

$$\Phi_x H_x + \Phi_y H_y - \Phi_z + \Phi_x h'_x + \Phi_y h'_y = 0 \quad \text{on } H \quad (8)$$

$$h' = \frac{1}{2}Fn^2(1 + \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi - 2\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi) - H \quad \text{on } H \quad (9)$$

식(9)을 식(8)에 대입한 후 정리하면, 다음의 선형화된 혼합 자유수면 경계조건식을 얻을 수 있다.

$$-Fn^2[\Phi_x(\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi)_x + \Phi_y(\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi)_y] + \Phi_x H_x + \Phi_y H_y - \Phi_z$$

$$= -\Phi_x \left[\frac{1}{2}Fn^2 \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi - H \right]_x - \Phi_y \left[\frac{1}{2}Fn^2 \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi - H \right]_y \quad \text{on } H \quad (10)$$

자유수면 경계조건식은 실제 자유수면인 h 에서 만족하여야 하지만, h 가 구하여야 할 값이므로 직접적으로 h 에서는 해를 구하지 못하며 대신 h 가 H 에 비하여 충분히 작다는 가정 하에서 이미 그 값을 알고 있는 H 에서 적용하게 된다. 비선형 자유수면 경계조건식을 만족시키는 해는 선형화된 식(10)을 반복적으로 풀어서 구하게 된다. 이때 초기 추측해는 Neumann-Kelvin형으로 알려진 바와 같이 식(10)에 $H=0$, $\Phi_x=1$, $\Phi_y=0$, $\Phi_z=0$ 를 적용하여 구하거나 또는 이중모형근사에 의하여 구하게 된다.

반복계산 중에 구하여진 해가 다음 식을 만족하는 경우에 수렴하였다고 가정하였다.

$$\varepsilon_k < 0.002U, \quad \varepsilon_d < 0.0025Fn^2 \quad (11)$$

여기서,

$$\varepsilon_k = \Phi_z - \Phi_x H_x - \Phi_y H_y$$

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2}Fn^2(1 - \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi) - H$$

로 정의된다.

본 연구에서는 반복계산 중에 보다 안정적인 수치해석을 수행하기 위하여 상방향 자유수면 패널이동법과 자유수면에서 만족점을 상류방향으로 일정거리만큼 이동하는 방법을 채택하였다(Raven 1996).

3. 패널절단법(Panel Cutting Method)

패널법을 사용하여 선체주위의 유동해석을 수행하기 위해서는 선체표면을 정의하는 패널을 생성하여야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 비선형 자유수면 경계조건을 만족시키기 위하여서는 반복계산을 수행하여야 하며, 각 반복계산단계마다 이전 반복계산단계에서 구하여진 선측파고를 따라서 선체표면의 패널을 다시 생성해주어야 한다. 이때 새롭게 생성된 패널은 초기에 주어진 패널의 형상을 유지하면서 생성되어야 한다.

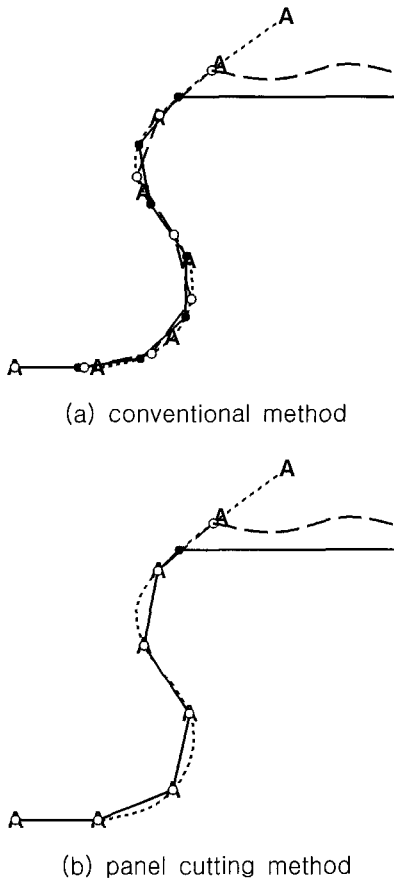


Fig. 2 Comparison between grid lines generated using conventional method and panel cutting method

Fig. 2는 선체표면에 대한 패널생성기법에 대하여 기존에 사용된 방법(a)과 패널절단법(b)을 적용하였을 때 생성된 패널을 서로 비교한 것이다. A로 표시된 꼭짓점은 초기에 입력된 선체좌표를 나타내고, ●으로 표시된 꼭짓점은 교란되지 않은 자유수면에 대하여 생성된 패널을 나타내며, ○으로 표시된 꼭짓점은 교란된 자유수면에 대하여 선측파고를 따라서 생성된 패널을 나타낸다.

Fig. 2에 나타낸 것처럼 기존의 패널생성방법에서는 초기에 동일한 개수의 종 방향 격자선들의 집합으로 구성된 격자망이 입력되고, 매 반복계산 단계마다 이전의 반복계산단계에서 구하여진 선측

파고와 초기에 입력된 종 방향 격자선을 서로 비교하여 선측파고보다 아래에 있는 기하학적 정보를 가지고 초기에 주어진 종 방향 꼭짓점의 수만큼 새롭게 종 방향 격자선을 구성하는 꼭짓점들을 생성하여 수치해석을 위한 계산패널로 사용한다. 반면, 패널절단법에서는 종 방향 격자선이나 격자망, 그리고 꼭짓점의 수와는 무관하게 단지 패널을 이루는 두 점(2차원의 경우)이 선측파고보다 위에 있는지, 아래에 있는지 또는 서로 교차하는지의 여부를 고려하여 계산패널을 생성하게 되며, 서로 교차하는 경우에는 그 교점을 구하고 패널을 이루는 두 점 중에서 선측파고보다 아래에 있는 꼭짓점과 서로 연결하여 계산패널을 생성하면 된다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 패널절단법을 사용하여 계산패널을 생성하는 경우에는 선측파고가 이동한 후에도 꼭짓점들이 이동을 하지 않아서 초기에 입력된 선체표면을 구성하는 패널을 유지하는 반면, 기존의 패널생성방법을 사용하는 경우에는 선측파고가 바뀌면서 꼭짓점들이 계속 움직이므로 초기에 주어진 선체표면의 패널과 서로 다른 형상을 가지는 것을 알 수 있다. 이 같은 현상은 패널의 수가 많은 경우에는 문제가 되지 않을 수 있지만, 패널의 수가 적은 경우에는 심각한 문제를 야기할 수 있다고 생각되며, 특히 선체표면의 곡률이 심한 부분에서 이와 같은 현상은 두드러질 것으로 예상된다.

Fig. 3과 4는 3차원의 선체표면에 분포된 사각형 패널에 대하여 패널절단법을 적용한 예를 보여주고 있다. 선측파고가 구하여지면 선측파고와 임의의 패널을 정의하는 4개의 꼭짓점간의 상호위치를 비교한다. Fig. 3의 (a)와 같이 만약 4개의 꼭짓점이 모두 선측파고보다 아래에 있으면 계산패널로 그대로 사용하고, (b)와 같이 4개의 꼭짓점 모두 선측파고보다 위에 있으면, 계산패널에서 제외한다. 선측파고와 패널이 서로 교차하는 경우는 크게 분류하여서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 총 6가지 경우가 있을 수 있으며, 이 경우에는 패널을 이루는 꼭짓점들과 선측파고간의 위치를 고려하여 절단된 패널을 정의한다. 특히 Fig. 4(b)의 경우처럼 패널 절단 후에 5각형이 생길 때는 다시 패널

을 두 개의 사각형패널들로 나누어서 생성하면 되고, Fig. 4의 (c), (d), (f)의 경우처럼 삼각형패널이 발생할 때는 그대로 사용하면 된다.

Fig. 3과 4에서 계산에 사용되는 패널은 실선으로 표현하였으며, 점선으로 표시된 부분은 계산에서 제외된다. 고딕체로 표시된 숫자는 초기에

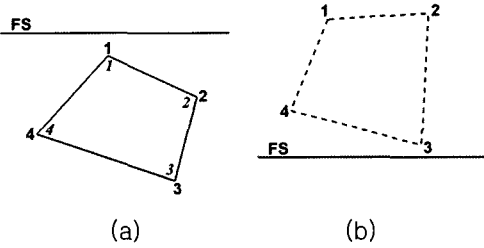


Fig. 3 Hull panel location relative to free surface

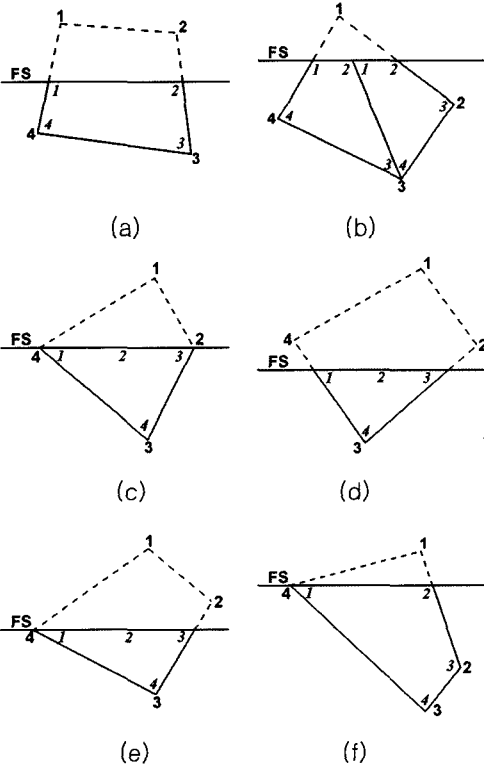


Fig. 4 Panel cutting cases

주어진 사각형패널 꼭짓점의 입력순서를 나타낸 것이고, 사각형 패널의 내부의 이탤릭체로 표시된 숫자는 새롭게 생성된 사각형 패널의 꼭짓점의 입력순서를 나타낸 것이다.

패널절단법을 이용하여 계산패널을 생성하는 과정에서 면적이 상대적으로 너무 작은 패널이 생성되는 경우가 발생할 수 있으며, 수치해석의 오류를 유발할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위하여 새롭게 정의된 패널의 면적이 초기패널 중 가장 작은 패널면적의 1/20이하이면 계산에 포함시키지 않았다.

Fig. 5는 기존의 패널생성기법(a)과 패널절단법(b)을 사용하여 생성된 계산패널을 서로 비교한 것으로, 점선으로 표시된 것은 초기에 입력된 선체표면을 정의하는 패널을 나타내고, 실선으로 표시된 것은 교란되지 않은 자유수면에 대하여 생성된 계산패널을 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 패널절단법을 사용하여 계산패널을 생성하는 경우에는 초기에 입력된 선체표면에 대한 패널의 기하학적 정보를 그대로 유지하는 반면, 기존의 패널생성기법을 사용하여 생성된 계산패널은 초기에 입력된 패널과는 서로 다른 형상을 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 선체가 과도한 트림이나 침하량을 가지는 경우에 대하여 패널절단법을 사용하여 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 선체주위 유동계산을 수행하여 구한 자유수면과 초기에 입력된 선체표면의 패널의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)은 자유수면과 수평한 위치에서 선체를 바라본 경우를 나타낸 것이고, Fig. 6(b)는 자유수면의 위에서 선체를 바라보았을 때, 그리고 Fig. 6(c)는 자유수면의 아래에서 선체를 바라보았을 때를 나타낸 것이다. 기존의 패널생성기법은 격자망을 구성하는 중 방향 격자선 전체가 선축파고의 아래에 있거나 또는 선축파고와 서로 교차하는 경우라도 모든 중 방향 격자선이 자유수면과 교차하는 경우에 한하여 계산패널을 생성할 수 있었으므로 위와 같은 패널분포를 가지는 경우에 대하여서는 수치해석을 수행하지 못하였다. 그러나 패널절단법의 경우에는 임의의 패널과 선축파고와의 관계만을 고려하여 계산패널을 생성하기 때문에 Fig. 6에 나

타낸 것과 같이 종 방향 격자선의 일부는 모두 선축파고의 위에 있고 또 일부는 선축파고와 교차하는 경우에도 계산패널을 생성하여 유동해석을 수행할 수 있다.

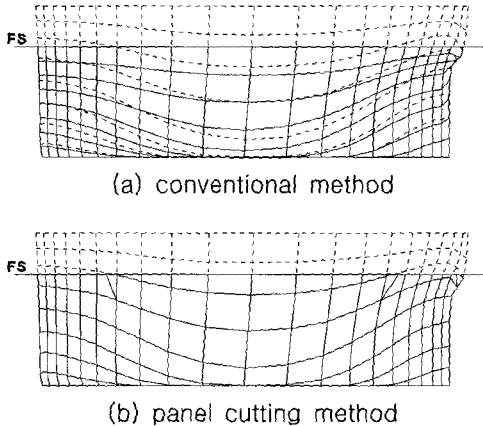


Fig. 5 Comparison of panels generated using conventional method and panel cutting method(5 times magnified in z-direction)

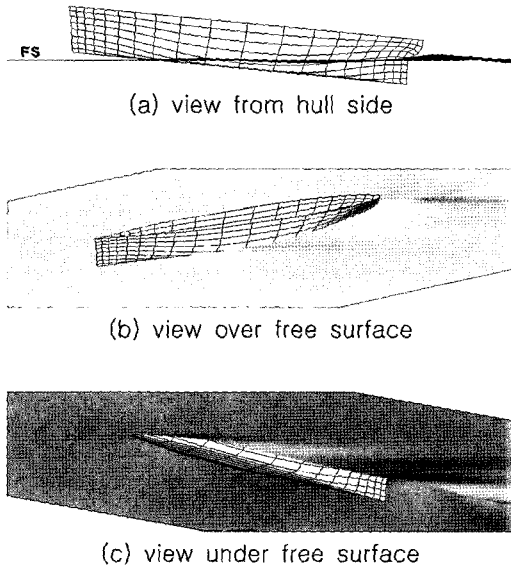


Fig. 6 Configuration of hull panel and free surface

4. 수치해석결과

개발된 수치해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 근래 광범위하게 연구가 진행된 바 있는 선형인 series 60($C_B=0.60$)선형에 대하여 수치해석을 수행하고 그 결과를 모형시험값과 비교하였다.

선박의 특성치들은 수선간길이를 무차원화 하였으며, FP는 $x=-0.5$, AP는 $x=0.5$ 에 위치한다.

선체표면을 정의하는 패널은 Fig. 7에 보이는 바와 같이 선체중앙부에 비하여 곡률이 심한 선수부와 선미부에 촘촘하게 분포하였다.

자유수면에 분포된 패널들을 Fig. 8에 보였다. 선체의 길이방향으로는 동일한 길이 ($\delta x_{FS} = constant$)를 가지게 하였고, 폭 방향으로는 선체근처의 유동이 선체에서 먼 영역에서의 유동보다 더 변화가 심할 것이라는 가정 하에 선체 근처에서 패널들을 다소 촘촘하게 분포하였다. 소오스패널은 상방향으로 δx_{FS} 만큼 이동하였으며, Fig. 8에서 \times 로 표현된 자유수면경계조건의 만족점은 해의 안정성을 위하여 $0.25\delta x_{FS}$ 만큼 상류방

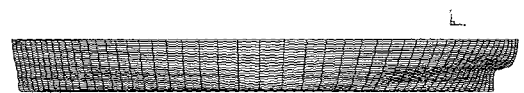


Fig. 7 Hull panel distribution of series 60($C_B=0.60$) hull

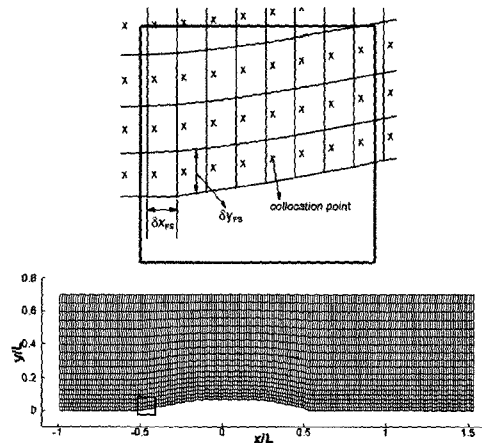


Fig. 8 Free surface panel distribution

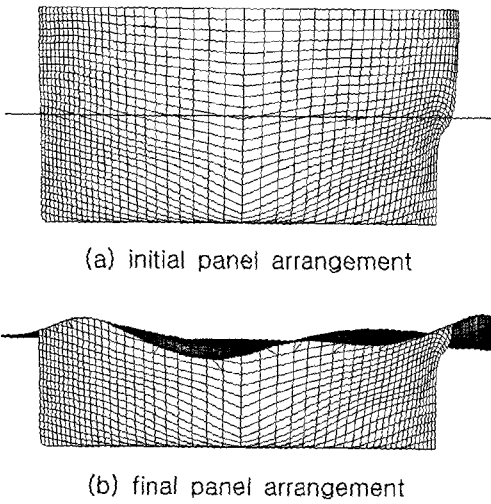


Fig. 9 Comparison between initial and final panel arrangement(5 times magnified in z-direction)

향으로 이동하였다.

Fig. 9는 초기에 입력된 패널과 최종 반복계산 단계에서 사용된 선체표면에 대한 계산패널을 서로 비교한 것으로 선측파형을 따라가면서 패널이 절단된 형상을 나타낸 것이며, 비교를 용이하게 하기 위하여 높이 방향으로 5배 확대하였다.

Fig. 10과 11은 $Fn=0.25$ 인 경우에 자유수면에서의 파형과 선측에서 폭 방향으로 일정거리만큼 떨어진 곳에서의 파고를 비교한 것이다. 실험값과 비교하여 수치계산결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 선미부에서는 비정상유동이라는 가정으로 인하여 실험값보다 다소 큰 파가 생성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12와 13은 $Fn=0.316$ 에서 자유수면에서의 파형과 파고를 서로 비교한 것이다. Fig. 10과 11에서 언급한 바와 같이 선미부를 제외하고 전반적으로 실험값과 비교하여 수치계산결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14는 조파저항계수를 서로 비교한 것으로, 수치계산결과가 전반적으로 모형시험결과를 잘 예측하는 것을 볼 수 있다(Kim and Jenkins 1981).

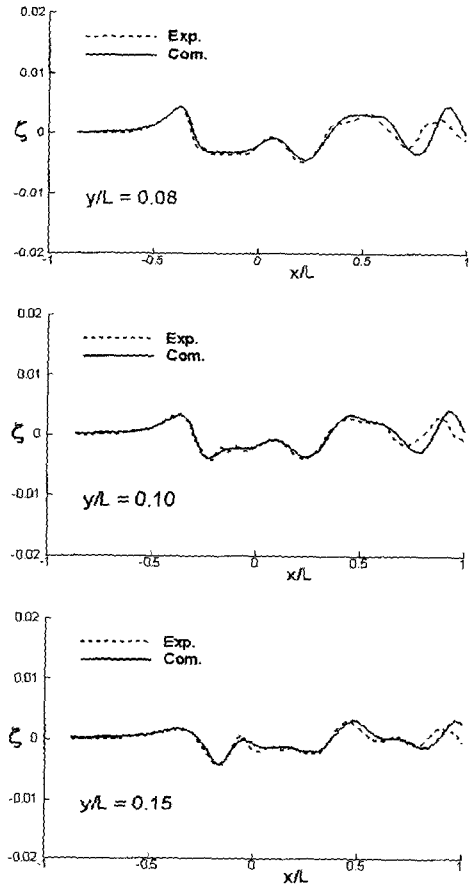


Fig. 10 Comparison of wave heights for series 60($C_B=0.6$) at $Fn=0.25$

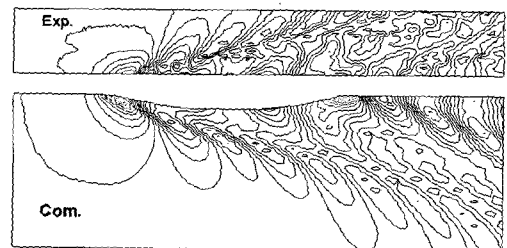


Fig. 11 Comparison of wave pattern at $Fn=0.25$ for series 60($C_B=0.6$)

수치해석에 의한 조파저항계수를 선체표면의 압력을 적분하여 구하였다(Choi et al. 2005).

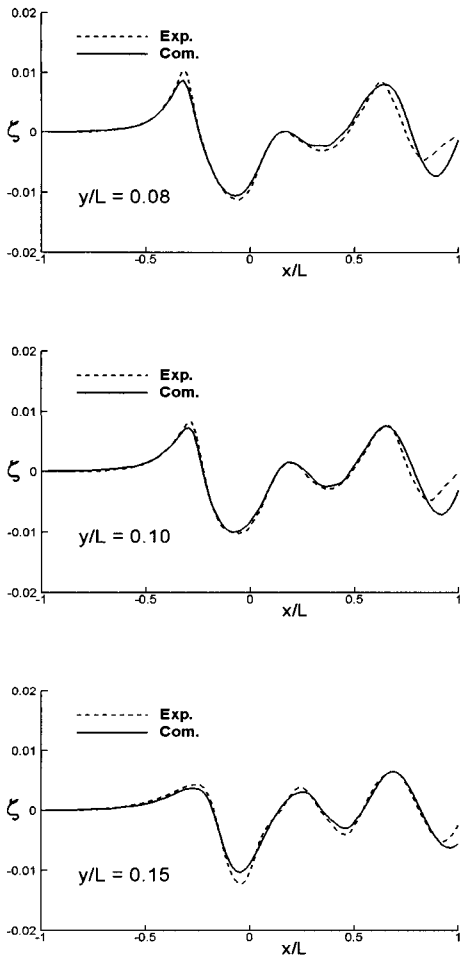


Fig. 12 Comparison of wave heights for series 60($C_B=0.6$) at $Fn=0.316$

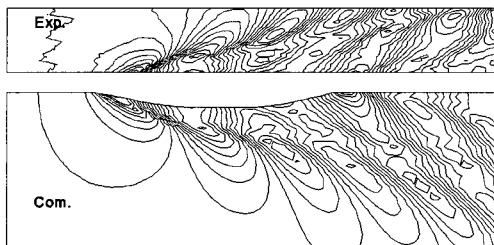


Fig. 13 Comparison of wave pattern at $Fn=0.316$ for series 60($CB=0.6$)

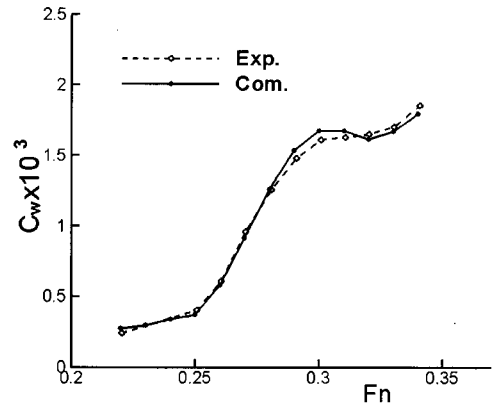


Fig. 14 Comparison of C_w for series 60($C_B=0.6$)

5. 결론

본 연구에서는 기존의 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 선체주위의 포텐셜유동해석기법에 패널절단법이라는 새로운 선체표면 패널생성기법을 제안하였다. 실제 선체주위의 유동계산에 적용여부를 확인하기 위하여 현재 광범위하게 연구가 수행된 선박인 series 60($C_B=0.60$)선형에 대하여 유동계산을 수행하고, 그 결과를 모형시험값과 비교함으로써 개발된 수치해석기법의 우수성과 실용성을 보이고자 하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 패널절단법을 사용하여 초기에 선체표면을 정의하는 패널의 형상을 최대한 유지하면서 비선형 자유수면 경계조건을 만족시키기 위한 반복 계산단계에서 필요한 계산패널을 간편하게 생성할 수 있었다.
2. 과도한 트림과 침하량으로 인하여 선체의 자세가 급격히 변화한 경우에도 패널절단법을 사용하여 유동계산에 필요한 선체표면에 대한 계산패널을 용이하게 생성할 수 있었다.
3. 패널절단법을 사용하여 계산한 수치해석결과가 모형시험을 통하여 구한 시험결과를 잘 예측한다는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과를 근거로 하여 본 연구에서 개발한

패널절단법이 비선형 자유수면 경계조건을 고려한 선체주위 유동계산에 유용하게 적용될 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 앞으로 다양하고 복잡한 여러 가지 선종에 대한 수치해석을 수행하고 모형시험과의 비교를 통하여 더 개선되고 선박설계에 유용한 선체주위 유동해석프로그램을 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 국가연구개발사업 (PN00770)과제와 MOERI/KORDI의 기본연구사업 (PE0114C)의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 김도현, 김우전, 반석호, 2000, "패널법을 이용한 일반 상선의 비선형 조파문제 해석," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 1-10.
- 김우전, 반석호, 1999, "기본 오프셋을 이용한 상선의 선체표면 격자계 생성방법," 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 1호, pp. 61-69.
- Choi, H.J., Kim, M.C. and Chun, H.H., 2005, "Development of an Optimal Hull Form with Minimum Resistance in Still Water," SOTECH, Vol. 9, No. 3, pp. 1-13.
- Dawson, C.W., 1977, "A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems," Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, pp. 30-38, University of California, Berkeley, USA.
- Hess, J.L. and Smith, A.M.O., 1962, Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies, Douglas Aircraft Company, Report No. 40622.

- Kim, K.J., 1989, Ship Flow Calculations and Resistance Minimization, Ph.D. Thesis, Chalmers University, Gothenburg, Sweden.
- Kim, Y.H., Jenkins, D., 1981, "Trim and Sinkage Effects on Wave Resistance with Series 60, $C_b=0.60$," DTNSRDC/SPD1013-01.
- Ni, S.Y., 1987, Higher Order Panel Methods for Potential Flows with Linear or Non-Linear Free Surface Boundary Conditions, Ph.D. Thesis, Chalmers University, Gothenburg, Sweden.
- Raven, H.C., 1996, A Solution Method for the Non-Linear Ship Wave Resistance Problem, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Xia, F., 1986, Numerical Calculation of Ship Flows with Special Emphasis on the Free Surface Potential Flow, Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.



< 최 희 종 >



< 김 진 >



< 반 석 호 >



< 박 일 홍 >



< 김 광 수 >