

## 패널법을 이용한 일반 상선의 비선형 조파문제 해석

김도현\*, 김우전\*, 반석호\*

### Analysis of the Nonlinear Wave-Making Problem of Practical Hull Forms Using Panel Method

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

#### 요 약

일반 상선의 비선형 조파문제를 해석하기 위해 상방향 패널법에 기반을 둔 패널법을 개발하였다. 먼저 현재의 비선형 방법의 검증에 위해 많은 실험값이 존재하는 Series 60 선형에 개발된 방법을 적용하였다. 실제적인 응용의 경우로 KRISO 3600TEU 컨테이너선과 KRISO 300K 유조선에 개발된 방법을 적용하였다. 특히 두 상선이 유기하는 파계의 비선형성에 중점을 두고 계산된 파계를 KRISO의 실험값과 비교, 검증하였다. 비교 결과, 현재의 비선형 방법은 Dawson의 방법이나 Neumann-Kelvin해와 같은 선형 방법에 비해 월등히 그 결과가 좋음이 확인되었다.

#### Abstract

A panel method based on the raised panel approach is developed for the nonlinear ship wave problem of practical hull forms. For the validation of the present numerical scheme, the developed method is first applied to Series 60 hull for which the extensive experimental data are available. As practical applications, the developed method is applied to KRISO 3600 TEU container ship and KRISO 300K VLCC. With the primary emphasis on the nonlinear effects of the global wave pattern generated by the two commercial ships, the calculated wave patterns are compared and verified with the experiments of KRISO. It is found that the calculated results of the present method are quite satisfactory compared with the linear methods like Dawson's approach and Neumann-Kelvin solution.

---

접수일자: 2000년 2월 28일, 승인일자: 2000년 8월 28일

\* 정회원, 한국해양연구소, 선박해양공학분소, 선임연구원(E-mail: kimdh@kriso.re.kr)

\* 정회원, 한국해양연구소, 선박해양공학분소, 선임연구원(E-mail: wjkim@kriso.re.kr)

\* 정회원, 한국해양연구소, 선박해양공학분소, 책임연구원(E-mail: shvan@kriso.re.kr)

## 1. 서 론

Dawson(1977) 이후로 선형화된 자유수면 조건식을 사용하는 Rankine 소오스 패널법은 선형의 개선에 이용될 정도로 많은 발전이 있었다. 그리고 실제로 제한된 범위 안에서 선형의 개선에 많은 도움을 주었다. 그러나 Dawson의 방법은 선형화(linearized)된 자유수면 조건식을 사용하기 때문에 선박이 유기하는 파계가 비선형성이 강한 경우에는 나름대로의 경험으로 그 결과의 해석에 주의를 기울여야했다.

선형화된 자유수면 조건식을 사용하는 패널법의 계산 정도를 개선하기 위해 조파문제를 비선형해로 구하려는 노력이 여러 연구자들에 의해 이루어졌다. 비선형 조파문제에 있어서 가장 문제가 되었던 것은 초기의 Kim(1989) 과 Kim/Lucas(1990)의 연구에서 보이듯이 비선형해의 수렴성이 좋지 않다는 것이었다. 이러한 비선형해의 수렴성 문제는 비선형해를 구하기 위해 반복계산 중 자유수면 패널을 자유수면 형상에 맞추어 새로 분포하는 과정에서 주로 기인하였다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 Raven(1996)은 자유수면 패널을 정수면 위에 분포하고 만족점(collocation point)만을 자유수면 형상에 맞추어 이동시키는 상방향 패널 기법을 사용하였고 개발된 수치기법을 다양한 실제 선형에의 적용을 통해 비선형해의 계산 정도와 수렴성이 많이 개선되었음을 보였다. Raven(1996) 이후 비선형 반복계산시 사용한 모유동(base flow), 반복 계산시 필요한 비선형 자유수면 조건식의 선형화 과정이 조금씩 다르기는 하지만 상방향 패널 기법을 사용하는 비슷한 수치 기법을 Janson(1997)이 개발한 바 있다. 상방향 패널 기법은 Xia(1986)와 Jensen(1989)에 의해 먼저 시도되었지만 이들의 연구에서는 컨테이너선, 유조선 등과 같은 실제 선형에 적용할 만큼 만족할 만한 수렴성을 확보하지 못하였다.

본 논문에서는 기본적으로 Raven의 방법을 따르고 있고 실제 선형에 적용할 수 있는 정도의 수렴성을 가지는 비선형 조파문제의 수치기법을 개

발하고자 하였다. 컨테이너선, 벌커선, 유조선등과 같은 실제 선형에서 조파저항 계수를 정량적으로 추정하는 것은 매우 어렵다. 이는 현재의 패널법에서는 계산된 조파저항 계수가 패널 의존도가 특히 심해 신뢰할 수 없다는 점에 기인한다. 그래서 통상 현재의 방법과 같은 선박의 조파문제를 해석하는 수치기법들을 이용한 선형 설계시 계산되어진 파계를 서로 비교하여 여러 선형들의 우열 비교를 수행하는 것이 보통이다. 이에 본 논문에서는 개발된 수치 해석 방법의 비선형해가 실제 선형이 유기하는 파계를 얼마나 정확히 추정하는지 검증하는 것에 중점을 두었다.

아래에 현재 사용된 수치해석 방법을 간략히 설명하고 Series60 선형에의 적용을 통해 개발된 수치 방법의 검증 결과를 설명하고 좀 더 실제적인 선형인 컨테이너선 KCS(KRISO 3600TEU), 유조선 KVLCC(KRISO 300K VLCC)에 현재의 방법을 적용한 결과를 설명한다.

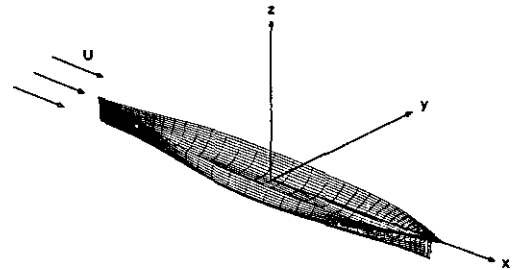


Fig.1 The coordinate system

## 2. 수치해석 방법

계산에서 사용된 좌표계는 Fig.1과 같이 우수 좌표계를 택하고 x축은 선수에서 선미로 향하고 y축은 우현으로, z축은 위로 향하는 좌표계를 사용하였다. 모든 변수들은 배 길이(L)와 상류에서의 유속(U), 유체의 밀도( $\rho$ )로 무차원화 되었다.

2.1 지배방정식, 경계조건

배에 고정된 좌표계를 사용하고 비점성, 비압축성, 비회전성의 퍼텐셜 유동으로 가정하면 속도퍼텐셜  $\phi$ 는 아래의 지배방정식과 경계조건을 만족시켜야 한다. 우선 잘 알려진 바와 같이 속도퍼텐셜  $\phi$ 는 지배방정식으로 라플라스 방정식 (Laplace equation)을 만족시켜야 한다.

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

다음으로 만족시켜 주어야 할 경계조건은 선체에서 유동의 법선 방향 속도 성분이 없어야 한다는 조건이고 이것은 아래의 식으로 표현된다.

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

또 다른 경계조건으로 자유수면에서의 압력이 대기압이어야 한다는 다음의 동적 자유수면 조건식(dynamic free-surface condition)을 만족하여야 한다.

$$h + \frac{Fn^2}{2} (\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2 - 1) = 0 \quad \text{on } z = h \quad (3)$$

위 식에서  $h$ 는 자유수면의 파고를 의미하고  $Fn$ 는  $Fn = U/\sqrt{gL}$ 로 정의되는 Froude 수이다. 자유수면에서 만족되어야 할 다른 하나의 조건으로 아래의 운동학적 자유수면 조건식(kinematic free-surface condition)을 만족시켜야 한다.

$$\phi_x h_x + \phi_y h_y - \phi_z = 0 \quad \text{on } z = h \quad (4)$$

마지막으로 식(5)와 같은 방사조건을 만족시켜야 한다.

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

비선형계산을 위해 우선 속도퍼텐셜, 파고를 다음과 같이 분해한다.

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

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

위 식에서  $\Phi$ 는 모유동 속도퍼텐셜,  $\phi'$ 는 교란 속도퍼텐셜,  $H$ 는 모파고,  $h'$ 는 교란파고를 의미한다. 여기서 교란 속도퍼텐셜, 교란파고는 작다고 가정하고 이 교란에 대해 자유수면 조건식, 식(3), (4)를 선형화 하면 식(8), (9)와 같고 이 식은  $y = H$ 에서 만족시켜 준다.

$$\Phi_x h_x + \Phi_y h_y + \phi'_x h_x + \phi'_y h_y - \Phi_z - \phi'_z = 0 \quad (8)$$

$$h = \frac{1}{2} Fn^2 (1 - \Phi_x^2 - \Phi_y^2 - \Phi_z^2 - 2\Phi_x \phi'_x - 2\Phi_y \phi'_y - 2\Phi_z \phi'_z) \quad (9)$$

식 (9)에서 비선형 계산을 위해  $\Phi_z$ 성분이 남아 있음에 주의해야 한다. 실제 이산화 과정에서 식 (8), (9)를 식 (10), (11)로 정리하고 식 (11)을 식(10)에 대입해 속도 퍼텐셜로만 표현된 식을 사용한다.

$$\phi_x H_x + \phi_y H_y + \Phi_x h'_x + \Phi_y h'_y - \phi_z = 0 \quad (10)$$

$$h' = \frac{1}{2} Fn^2 (1 + \Phi_x^2 + \Phi_y^2 + \Phi_z^2 - 2\Phi_x \phi_x - 2\Phi_y \phi_y - 2\Phi_z \phi_z) - H \quad (11)$$

위의 두 식에서 초기조건으로 모파고(base height), 모유동(base flow)을  $H=0, \Phi_x=1, \Phi_y=0, \Phi_z=0$ 로 주면 잘 알려진 바와 같이 Neumann-Kelvin 자유수면 조건식을 얻는다. 그리고 반복계산 중에는 아래의 식으로 운동학적(kinematic), 동적(dynamic) 자유수면 조건식

이 만족하는지를 검사한다.

$$\varepsilon_k = \phi_z - \phi_x H_x + \phi_y H_y \quad (12)$$

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2} Fn^2(1 - \phi_x^2 - \phi_y^2 - \phi_z^2) - H \quad (13)$$

위 식에서  $\varepsilon_k$ 와  $\varepsilon_d$ 는 각각 운동학적, 동적 자유수면 조건식의 방정식 잔차(equation residual)이다. 본 계산에서는  $\varepsilon_k$ 는  $Fn$ 의 0.1%~0.3%를,  $\varepsilon_d$ 는 정체파고(stagnation height =  $Fn^2/2$ )의 0.3%~0.5%를 수렴 조건으로 사용하였다. 수렴 조건으로  $Fn$ 에 대해 상대적으로 표시한 것은 보통  $Fn$ 가 높은 고속선에서는 선형이 날씬함으로 비선형성이 약해 수렴 조건을 크게 하고 반대로  $Fn$ 가 낮으면 대상 선형이 비대한 경우가 많고 비선형성이 강하기 때문에 수렴 조건을 좀 더 작게 주기 위함이다. 그리고 앞에서 언급한 정도의 수치를 수렴 조건으로 사용하면 충분히 수렴된 파계를 얻을 수 있었다.

## 2.2 상방향(Raised) 패널법

비선형계산은 Raven(1996)에 의해 시도된 방법과 같이 상방향 패널법을 사용하여 아래와 같은 반복계산법으로 구하였다.

1. 반복계산법의 초기값(initial guess)으로 자유수면은 정수면, 모유동은 균일류를 택하는 Neumann-Kelvin 유동을 가정한다.
2. 만족점을 자유수면 패널의 중심 아래 정수면에 둔다. 또는 필요에 따라 상류방향으로 이동시킨다.
3. 식 (10), (11)을 만족하고 선체표면에 비침투조건이 만족되도록 주어진 문제를 선형방정식으로 이산화 하여 푼다.
4. 만족점을 새로운 자유수면에 맞도록 이동시킨다.
5. 필요하면 새로운 파고에 대해 자유수면 패널을 재배치한다.
6. 모유동(base flow)을 새로운 해에 맞게 바

꾼다.

7. 식(12), (13)에 정의된  $\varepsilon_k$ 와  $\varepsilon_d$ 를 구해 주어진 오차범위 안에 있지 않으면 다시 3의 단계로 간다.

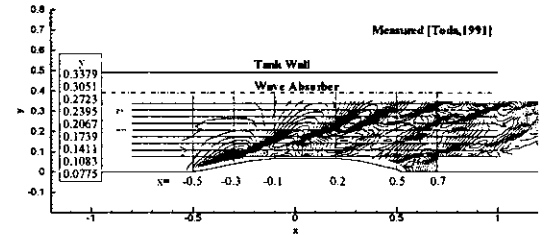


Fig.2 The positions of longitudinal and transverse cuts

## 3. Series 60 선형에의 적용

개발된 방법의 검증을 위해 우선 Series 60 선형에 대해서 계산을 수행하였다. 이 선형에 대해서는 Toda에 의해 계측된 파형의 실험값이 알려져 있으므로 이 실험값과의 비교로 개발된 방법의 검증을 할 수 있다. Series 60 선형 이  $Fn=0.316$ 의 속도로 달리는 경우에 대해 계산을 수행하였고 비교한 longitudinal cut과 transverse cut의 위치는 Fig.2와 같다. 그림에 보인 바와 같이 longitudinal cut은  $y=0.0775, 0.1083, \sim, 0.3051, 0.3379$ 까지 9개를, transverse cut은  $x=-0.5, -0.3, \sim, 0.5, 0.7$ 까지 6개를 비교하였다. 특히 Fig.2에서 수조 측면의 소파기가  $y=0.4$  위치에 있어  $y=0.3379$  cut은 소파기의 영향을 받을 가능성이 크다. 이에 대해서는 아래에 계산결과와 실험값의 비교 그림을 설명하면서 언급하였다.

선박의 조파문제를 풀 때 가장 먼저 고려해야 할 사항은 자유수면에 분포한 패널이 선박이 유기하는 파계를 충분히 포착할 수 있는 가를 검사하는 것이다. 이를 위해서 사용할 수 있는 적당한 무차원 수는 다음과 같은 가로파(transverse wave)의 파장이다.

$$\lambda = 2\pi Fn^2 \quad (14)$$

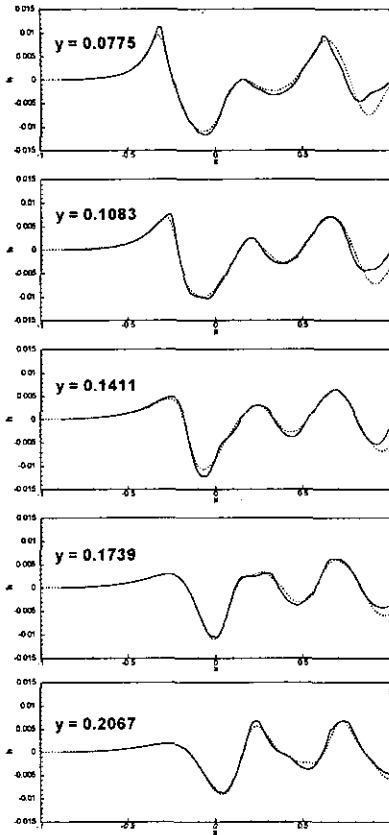


Fig.3 Comparison of longitudinal cuts(solid: exp., dashed: calculation)

정확한 파계를 추정하기 위해서는 위와 같이 추정되는 파에 대하여 보통 한 파장 당 20~30개 정도의 자유수면 패널이 필요한 것으로 알려져 있다. Series 60 선형의 경우 선체 패널을 고정하고 자유수면 패널을 한 파장당 20개, 25개, 30개, 40개로 바꾸어 가며 자유수면 패널에 대해 계산되는 파계의 수렴도를 검사하였다. 계산 결과 한 파장 당 40개의 패널을 분포하면 충분한 정확도의 수렴된 파계를 얻을 수 있었으나 본 계산에서는 Series 60 선형의 어깨 부근에서 발생하여 발산(diverging)하는 단파장의 파계를 포착하기 위하여 한 파장 당 60개의 패널 분포에 해당하는  $210 \times 18 = 4420$ 개의 패널을 자유수면에 분포하였다. 선체에는  $40 \times 16$ 개의 패널을 분포하였고 자유

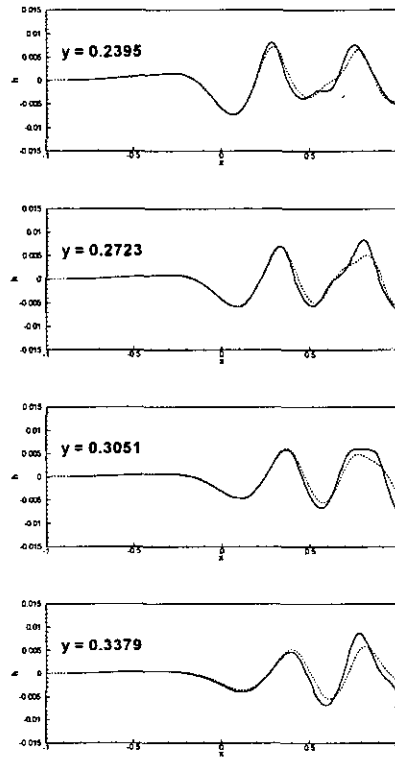


Fig.4 Comparison of outer longitudinal cuts (solid:exp.,dashed:calculation)

수면의 계산영역은 길이 방향으로 -1에서 1.2까지, 폭 방향으로 0.6까지 잡았다. 자유수면의 상방향 높이(Zr)는 0.012로, 자유수면 패널 재배치는 2번째, 5번째, 10번째 iteration에서 수행하였고 수렴을 위해서 파고에 대한 하향완화가 필요했다.

longitudinal cut에 대한 계산 결과를 Fig.3,4에 실험값과 비교하였다. 그림에서 보듯이 전반적으로 점선으로 표시된 계산 파형은 실선으로 표시된 실험값을 매우 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 다만 선체에서 멀어질수록 그리고 선미 부근의 파형이 실험값과 약간 차이를 보이는 정도이다. 특히  $y=0.0775$  cut에서 선미 뒤쪽의 계산 파형이 실험값보다 과도하게 추정되었는데 그 이유는  $y=0.0775$  cut에서 선미 뒤쪽 영역이 점성의 효과가 강한 반류 영역(wake region)이나

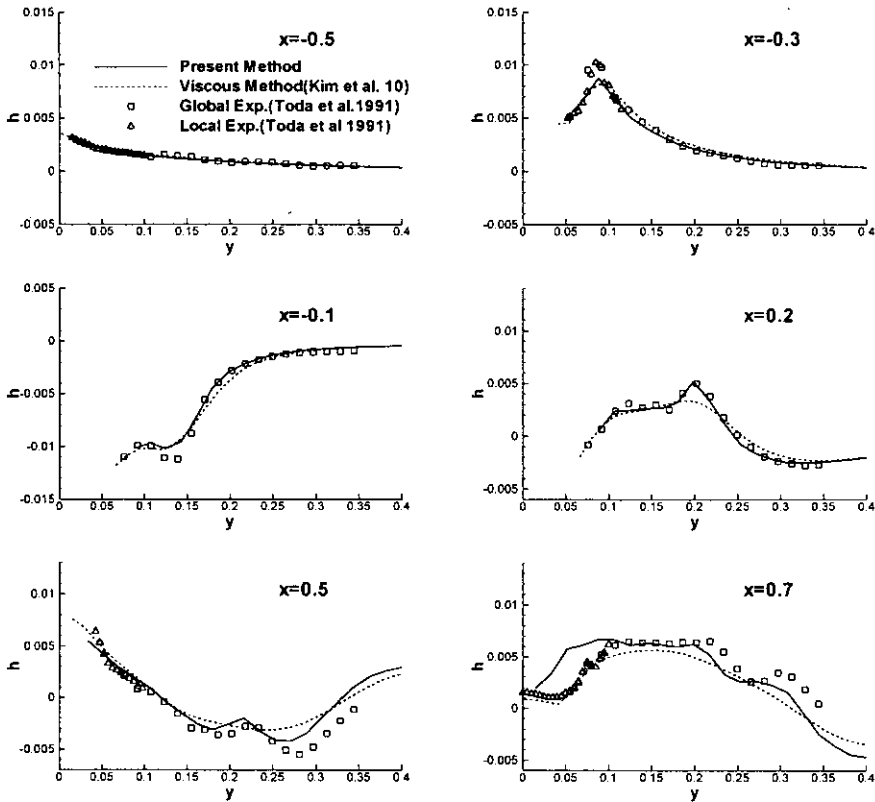


Fig.5 Comparison of transverse cuts

계산에서는 점성이 무시된 데 기인한다고 생각된다. 점성의 영향을 고려하면 선미 뒤쪽 영역에서의 파고가 실험치와 근접한 결과를 구할 수 있는데 이는 유한체적법을 사용하고 자유수면을 포함하여 점성 계산을 한 김도현 등(1999)의 결과에서 확인된 바 있다. 그리고  $y=0.3379$  cut에서 계산과 실험에서 측정된 파형에 위상(phase) 차이가 약간 보이는 데 이는 계산에서의 수치적 감쇠효과도 있겠지만 앞에서 언급하였듯이  $y=0.4$ 에 위치한 소파기에서 나온 반사파의 영향을 받았기 때문이라고 판단된다. 이는  $y=0.3051$  cut과  $y=0.3379$  cut의 그림을 비교하면 알 수 있다. 즉  $y=0.3379$  cut 위치에서  $x=0.4$  부근의 파정이  $y=0.3051$  cut에서의 파정보다 뒤쪽에 있어야 하는 데 실험값에서는 약간 앞쪽에 위치해 있으며 이로부터 소파기의 영향을 짐작할 수 있다.

다음으로 Fig.5에 transverse cut에서의 계산 결과를 실험값과 비교하였다. 이 그림에는 앞에서 언급한 논문(김도현 등 1999)의 점성 계산 결과를 같이 도시하였다. 전반적으로 점성을 무시한 패널법과 점성의 효과를 고려한 유한체적법 두 계산 방법 다 실험값을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 그러나 좀 더 세밀히 그림을 살펴보면 두 방법의 장단점을 파악할 수 있다. 특히  $x=0.7$  cut 그림이 두 계산 방법의 상황을 잘 나타내고 있다.  $x=0.7$  cut에서  $y=0.1$ 까지의 파형을 보면 점성 계산에서 나온 파형이 실험값을 거의 완벽하게 따라가고 있는 반면 패널법에서 나온 파형은 실험값과 큰 차이를 보이고 있다. 이는 앞에서도 언급하였듯이 이 영역이 점성의 효과가 큰 영역이기 때문이다. 그러나  $y=0.15$  이상의 영역에서는 패널법에서 나온 파형이 실험값을 잘 따르고 있다.

$x=0.7$  cut이 선미 영역의 cut 위치이긴 하지만  $y=0.15$  이상만 벗어나면 점성의 효과가 크지 않음을 이 그림을 통해 알 수 있다.  $y=0.15$  이상의 영역에서 점성 계산의 결과는 수치적인 감쇠효과가 패널법에 비해 크기 때문에 실험치를 잘 모사하지 못하고 있다.

이상에서 현재 개발된 비선형 자유수면 조건식을 고려한 패널법은 점성의 효과가 큰 선미 부근의 국부적인 영역을 제외하곤 전체적인 파계를 아주 잘 모사하고 있음을 확인하였다.

4. KCS와 KVLCC에의 적용

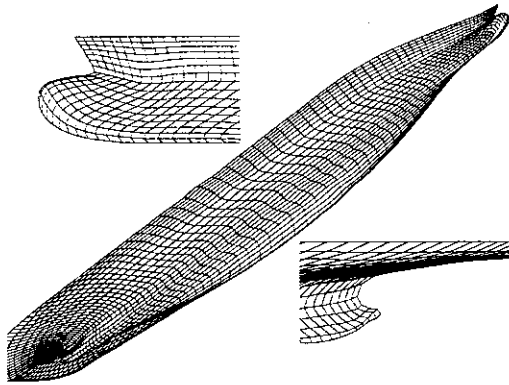


Fig.6 Hull panels distributed on KCS

다음 응용의 예로 실제 선형인 컨테이너선 KCS(KRISO 3600TEU container ship)와 유조선 KVLCC(KRISO 300K VLCC)에 대한 계산을 수행하였다. 이 두 선형은 KRISO에서 개발된 선형으로 저항, 자항시험과 더불어 파형, 선미 부근의 국부유동의 계측자료가 많은 선형이다 (Van et al. 1998).

통상적으로 이러한 실제 선형은 트랜섬 선미를 가지는 경우가 많으나 퍼텐셜 유동으로 이러한 트랜섬 선미 뒤의 유동을 정확히 모사하기에는 어려운 점이 많아 본 연구에서는 두 선형의 트랜섬 선미를 임의의 적당한 캡(Cap)을 씌워서 선미를 닫고 계산을 수행하였다. 따라서 선미 부근의 파형은 실제와 좀 다르게 모사되어 있다. 그리고 컨테

이너선의 경우와는 달리 유조선의 경우에는 트랜섬 선미의 크기가 작고 설계속도(15.5 Knots,  $Fn=0.142$ ) 워낙 낮기 때문에 기존의 트랜섬 선미 모델링(Raven 1996, 김도현 등 2000)이 잘 맞지 않는 영역이라 선미를 닫아서 계산하는 것은 일견 자연스러워 보인다.

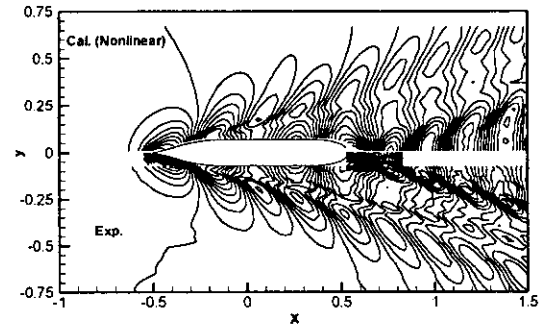


Fig.7 Comparison of wave pattern (nonlinear solution)

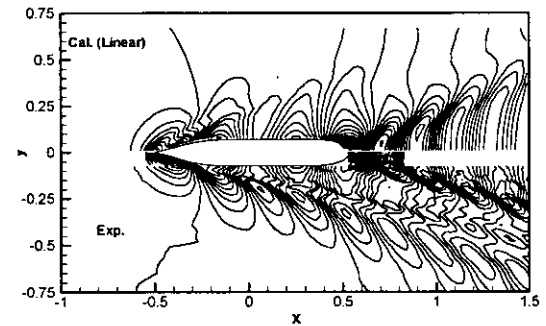


Fig.8 Comparison of wave pattern (linear solution)

우선 KCS의 계산조건은 선체에는 Fig.6에 보인바와 같이 80x16 개의 패널을 분포하였다. 실제 선형인 KCS의 경우 구상선수를 가지고 있고 선수, 선미 부근의 선형 변화가 심하므로 Series 60 선형보다 길이 방향으로 선체 패널을 더 많이 분포하였다. 자유수면에는 118x16개의 패널을 분포하여 설계속도인 26 Knots ( $Fn=0.26$ ) 경우의 계산을 수행하였다. 위의 자유수면의 패널분포는 한 파장당 25개의 패널이 들어가도록 분포

한 경우이다. KRISO 3600TEU의 경우 보통의 컨테이너선이 다 그러하듯이 설계 수선(design load water line)위에 트랜섬 선미를 가지고 있고 선미 부근(stern overhang)이 매우 편평하다. 이러한 편평한 선미를 가지는 선형에 대해서 초기 자유수면의 패널을 통상의 경우처럼 디자인 수선( $z=0$ )에 맞추어서 생성하면 선미부근의 자유수면의 패널의 몇몇 만족점들은 항상 선체 안에 있게되는 문제점을 가지게 된다. 이렇게되면 그곳에서 비선형 계산의 수렴이 어려워지므로 초기의 자유수면 패널분포를 디자인 수선보다 높은 수선에서 생성하여 자유수면 패널의 만족점이 선체 안에 존재하는 문제를 해결하였고 자유수면의 만족점을 상하방향 뿐만 아니라 폭 방향으로도 선체의 폭을 고려하여 반복계산 중에 이동시키는 방법을 사용하였다. 폭 방향으로의 만족점의 이동은 너무 한꺼번에 많이 움직이면 수렴에 문제가 되므로 하향완화를 하였다.

Fig.7에 계산된 전체적인 파계 그림을 KRISO의 실험값과 비교하였다. 계측된 전체 파계가 앞에서 언급한 이유로 인해 선미 뒤쪽의 파계를 제외하곤 계산에서도 거의 똑같이 재현되었다. 현재의 패널법이 이러한 실제 선형에 대해서도 선박이 유기하는 파계를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 그리고 같은 선형에 대해 선형화 방법의 하나인 Dawson 방법으로 계산된 결과를 Fig.7에 보였다. Fig.8과 비교하면 실제 선형에 대해서는 비선형 자유수면 조건식을 고려하지 않으면 그 파계가 제대로 모사되지 않음을 확연히 알 수 있다.

Fig.9,10에 각각  $y=0.1024$ ,  $2164$  위치의 longitudinal cut에서의 계측된 파형과 선형해, 비선형해로 계산된 파형을 비교하였다. 우선 두 cut에서 선형해로 추정된 파형은 Fig.8에도 보이듯이 KCS의 선수 부근에서 발산하는 선수 파계가 계측값과 상당히 차이가 남을 알 수 있다. 특히 문제가 되는 것은 Dawson 방법으로 계산된 KCS의 선수 파계가 이중 파정(double crest)을 가진다는 것이다. 선수 파계는 구상 선수와 관련하여 선형 설계시 매우 중요하게 보는 부분이고 이처럼 선수 파계가 불규칙하게 추정되면 우열 비

교가 어려울 가능성이 있다. 반면에 비선형해는 각 cut에서 이중 파정(double crest)없이 계산된 파형이 계측값을 잘 따라가고 있는 것을 알 수 있고 단지 수치 감쇠(numerical damping)로 인해 파정과 파저에서 계측값과 약간의 차이를 보이는 정도이다.

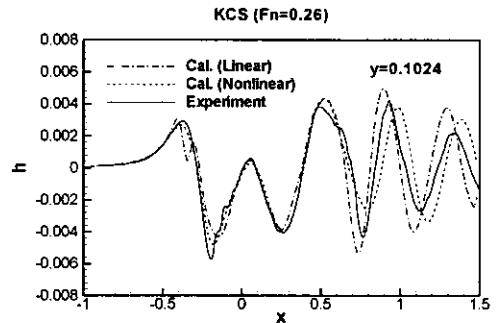


Fig.9 Comparison of wave elevation along longitudinal cut( $y=0.1024$ , KRISO 3600TEU)

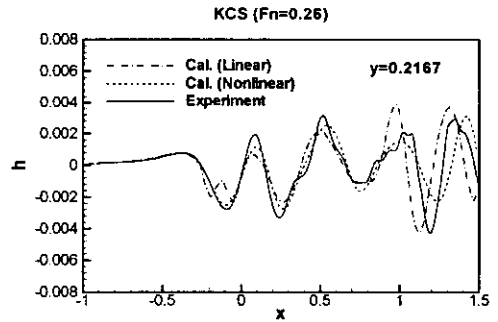


Fig.10 Comparison of wave elevation along longitudinal cut( $y=0.2164$ , KRISO 3600TEU)

다음으로 KRISO 300K 유조선의 경우로 선체에  $80 \times 16$ 개의 패널을, 자유수면에  $213 \times 16$ 개의 패널을 분포하여 설계속도인 15.5 Knots ( $Fn=0.142$ )의 경우를 계산하였다. 이 경우에는 Froude 수가 워낙 낮아 계산에 사용하고 있는 컴퓨터의 메모리와 계산 시간의 한계 때문에 한 파장당 15개의 패널을 분포하였다. 또 자유수면의 계산영역도 길이 방향으로  $-0.8$ 에서  $1.0$ 까지, 폭 방향으로  $0.54$ 까지로 작게 잡았다.



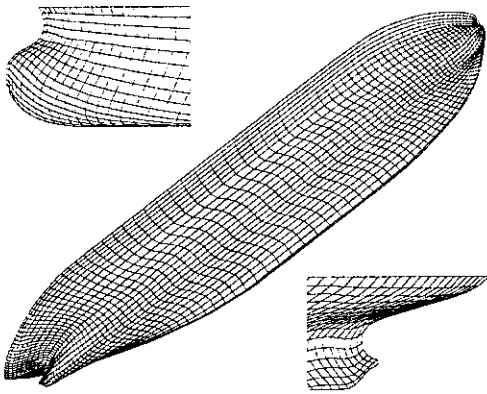


Fig.11 Hull panels distributed on KVLCC

KRISO 300K의 경우에는 KRISO 3600TEU의 경우와 달리 선미부근이 그렇게 많이 편평하지 않아 선미쪽에서는 별 다른 문제가 없었으나 선수 쪽의 수선면의 입사각(entrance angle)이 워낙 커서 선수부쪽의 파계가 반복계산 중에 워낙 급격하게 변하기 때문에 수렴에 어려움이 있었다. 특히 본 계산의 경우에는 길이 방향의 자유수면 패널의 길이가 워낙 작아 상방향에 위치한 자유수면과 만족점까지의 거리를 어느 정도로 유지하기 위해서는 자유수면 패널의 재배치가 필요하였다. 자유수면 패널 재배치는 2.6번째 iteration에서만 수행하였다. 그 계산된 결과를 Fig.12,13에 보이었다. 그림에서 보듯이 계산결과는 비교적 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

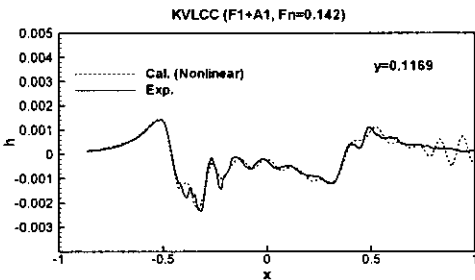


Fig.12 Comparison of wave elevation along longitudinal cut (y=0.1169, KRISO 300K VLCC)

여기서 선체의 중앙횡단면(midship)부근에서 계산값과 실험값이 약간의 차이를 보이는데 앞에

서 언급한 이유로 현재 자유수면에 분포한 패널 개수로는 이러한 단파장의 파형을 제대로 구현하기가 어렵다고 생각된다.

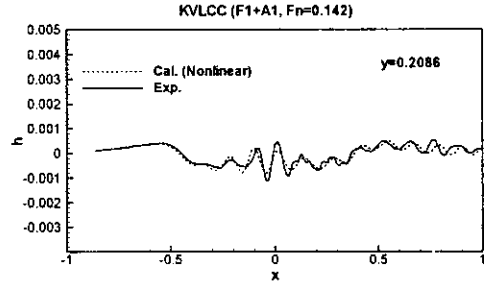


Fig.13 Comparison of wave elevation along longitudinal cut (y=0.2086, KRISO 300K VLCC)

y=0.1169 위치의 longitudinal cut에서 선형해인 Dawson 자유수면 조건식을 사용한 결과와 Kelvin 자유수면 조건식을 사용한 결과를 현재의 비선형해로 계산된 결과와 함께 Fig.14에 도시하였다.

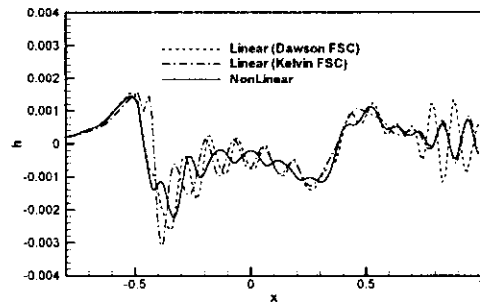


Fig.14 Comparison of wave elevation along longitudinal cut (y=0.1169, KRISO 300K VLCC)

우선 Fig.12에서 비선형해는 예측된 파형을 잘 묘사하고 있음을 보였고 Fig.14에서 두 선형해와 비선형해를 비교하면 x=-0.4에서 x=0.4까지의 단파장의 파계가 파고뿐만 아니라 위상(phase)도 많은 차이가 남을 알 수 있다. 특히 Kelvin 자유수면 조건식을 사용한 선형해는 선수 파계의 파정도 상당히 차이가 남을 볼 수 있다. 서론에서도 언급하였듯이 선형들간의 조파성능 입장에서의 우

열 비교는 계산되어진 파계를 비교하는 경우가 보통이고 이러한 관점에서 KVLCC와 같은 유조선의 경우 선형해에서 계산된 파계는 그 정도 (accuracy)에 문제가 있다고 사료된다.

## 5. 결 언

선박의 조파문제 계산에 널리 사용하는 패널법의 결과 향상을 위해 비선형 자유수면 조건식을 만족하는 패널법을 개발하였다. 개발된 패널법의 검증을 위해 실험 결과가 알려진 Series 60선형, KCS, KVLCC에 대한 계산을 수행하였다. 계속된 파형과의 비교를 통해 선형해에 비해 비선형해가 전체적인 파계를 훨씬 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 점성의 영향이 큰 선미부의 일부 영역을 제외하면 전체적인 파계에 대해서 실험치를 제대로 재현하고 있음을 확인하였다. 앞으로 많은 실제 선형에의 적용을 통해 개발된 방법의 튜닝(tuning)작업이 필요하고 계산 결과와 선형의 저항성능 평가와의 연관관계를 찾는 경험만 충분히 쌓인다면 현재의 방법이 앞으로의 선형평가 도구로서 충분히 사용될 수 있다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 김도현, 김우전, 반석호, 김효철, 1999, "유한체적법을 이용한 비선형 조파문제 계산," 대한조선학회 99' 춘계연구발표회.
- 김도현, 김우전, 반석호, 2000, "패널법을 이용한 DTMB Model 5415 순양함의 조파문제에 관한 연구," 대한조선학회 2000년 춘계연구발표회.
- Dawson, C.W., 1977, "A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems," Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley.
- Janson, C.E., 1997, "Potential Flow Panel Methods for the Calculations of Free-Surface Flows with Lift," Ph.D. Thesis, Chalmers University,

Gothenburg, Sweden.

- Jensen, G., Bertram, V. and Soding, H., 1989, "Ship Wave-Resistance Computations," 5th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Japan.
- Kim, K.J., 1989, "Ship Flow Calculations and Resistance Minimization," Ph.D. Thesis, Chalmers University, Gothenburg, Sweden.
- Kim, Y.H and Lucas, T., 1990, "Nonlinear Ship Wave," 18th Symp. Naval Hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Raven, H.C., 1996, "A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem," Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Toda, Y., Stern, F. and Longo, J., 1991, "Mean Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake Field of a Series 60, CB = 0.6 Ship Model for Froude Number 0.16 and 0.316," IIHR Report No. 352, Iowa, USA.
- Van, S.H. et al., 1998, "Experimental Investigation of the Flow Characteristics around Practical Hull Forms," Proc. of the third Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka, Japan.
- Xia, F., 1986, "Numerical Calculations of Ship Flows with Special Emphasis on the Free Surface Potential Flow," Ph.D. Thesis, Chalmers University, Gothenburg, Sweden.



김도현



김우전



반석호