

선미부에 유동제어판을 부착한 선박에 대한 포텐셜 유동해석

최희종*, 전호환^{†**}, 윤현식**, 이인원**, 박동우***, 김동진****

전남대학교 조선해양공학과*
부산대학교 첨단조선공학연구센터**
현대중공업 선박해양연구소***
한라대학교 컴퓨터응용설계과****

Potential Flow Analysis for a Ship with a Flow Control Plate near the Stern

Hee-Jong Choi*, Ho-Hwan Chun^{†**}, Hyun-Sik Yoon**, In-Won Lee**,
Dong-Woo Park*** and Don-Jean Kim****

Department of Naval Architecture & Ocean Eng., Chonnam National University* Advanced Ship
Engineering Research Center, Pusan National University**
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co.***
Department of Computer Aided Engineering, Halla University****

Abstract

In the paper the effect of a stern-plate attached to a ship was taken into account. The relationship between the trim angle of a ship and the wave-resistance coefficient induced by the a stern-plate was studied using the potential flow analysis method. Numerical algorithm was described using the panel method and the vortex lattice method(VLM) to simulate the flow phenomena around a ship. The non-linearity of the free surface boundary conditions were considered using the iterative method and the IGE-GMRES(Incomplete Gaussian Elimination-The Generalized Minimal RESidual) algorithm was adopted to solve the linear equation at each iterative step. Numerical calculations were carried out to investigate the validity of the adopted algorithm using KCS(KRISO 3600 TEU Container) hull. Possible cases for attachment of the plate were checked. The results showed that the numerical algorithm could be physically appropriate.

※Keywords: Flow control plate(유동제어판), Vortex lattice method(와류격자법), Nonlinear free surface boundary conditions(비선형 자유수면 경계조건), Vortex generator(와류발생기)

접수일: 2009년 1월 22일, 승인일: 2009년 11월 4일

† 교신저자: chunahh@pusan.ac.kr, 051-510-2341

1. 서론

전 세계가 고유가 시대로 접어들면서 모든 산업

분야에 있어서 에너지 절감과 관련된 기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 더욱이 우리나라와 같은 비산유국의 경우 에너지 절감 기술의 개발은 범국가적인 관점에서 관심을 기울여야 하는 중대 사안이며, 이에 따라 에너지를 절감할 수 있는 여러 가지 방법들이 산업체 다방면에서 제안되어지고 있으며, 실용화되고 있다.

조선 산업에 있어서 에너지 절감 기술의 개발은 주로 선박의 저항 성능 향상의 관점에서 이루어지고 있으며 우수한 저항 성능을 가진 선형을 개발한다거나 선체표면에 부가물을 부착함으로써 선형의 유체 역학적 성능 향상을 통하여 에너지 절감의 효과를 보고자 하는 것이 대부분이며 대표적인 것으로서 와류발생기(vortex generator)가 있다.

와류발생기는 항공기의 몸체나 날개에 장착하여 항공기 주변의 기체의 흐름을 제어함으로써 저항을 감소시키는 장치로서 주로 사용되어져 왔다. 근래 조선 공학 기술의 향상과 실험 유체 역학과 전산 유체 역학 등 유동 제어 기술의 급속한 발전으로 인하여 와류발생기와 유사한 기술을 조선 공학에 도입하여 선체주위의 유동을 제어하고자 하는 연구가 활발히 진행되어져오고 있으며 현재 실용화에 성공한 사례가 보고되고 있다(Broadley and Garry 1997, Lee et al. 2004, Wendt and Reichert 1996).

본 연구의 목적은 선미 유동 제어 장치로서 선미에 양력을 발생시키는 부가물인 유동 제어용 평판(이후 '유동제어판'으로 칭함)을 부착하였을 경우에 유동제어판이 선체에 미치는 영향을 유체역학적 관점에서 예측할 수 있는 수치해석 프로그램을 개발하는 것이다.

수치해석 알고리즘을 개발하기 위하여 포텐셜 유동 해석 기법인 패널법과 와류격자법(vortex lattice method)을 사용하였으며, 타당성을 검증하기 위하여 KCS(KRISO 3600 TEU)선형에 대하여 수치해석을 수행하였으며 적절한 유동제어판 크기, 부착 위치 그리고 부착 각도를 알기 위하여 여러 가지 경우에 대한 수치해석을 수행하여 적합한 유동제어판의 제원에 대한 정보를 얻고자 하였다.

2. 지배방정식과 경계조건

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

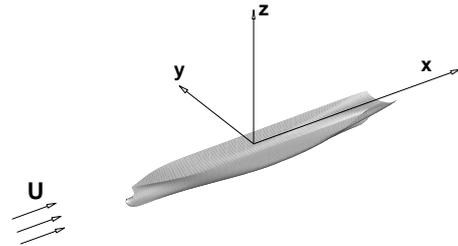


Fig.1 Coordinates system

비점성, 비압축성 유체라고 가정하고 유동의 비회전성을 가정하면 속도포텐셜이 존재하며 유장 내에서 지배방정식인 라플라스 방정식과 경계면에서 경계조건식을 부과함으로써 구할 수 있다. 지배방정식인 라플라스 방정식은 다음과 같다.

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

선체표면과 유동제어판에서 유체입자는 비침투 조건을 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.

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

유동제어판을 지나는 흐름은 유동제어판의 후면에서만 이탈된다고 가정하여, Kutta 조건이 날개의 후연을 따라서 만족되어야 한다.

$$\nabla\phi < \infty, \text{ at the trailing edge} \quad (6)$$

3. 적분방정식

유동제어판을 가진 선체와 자유수면을 포함하는 경계면 S 로 둘러싸인 유체영역에서는 라플라스방정식을 만족하는 속도포텐셜은 다음의 Green정리를 만족한다.

$$\phi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[\phi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) - \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] dS \quad (7)$$

여기서,

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

(x, y, z) : Field point

(x', y', z') : Singularity point

식(7)의 첫 번째 항은 다이폴(dipole)의 분포를 나타내므로, 이 항은 보오텍스(vortex)성분으로 표현될 수 있다. 순환 Γ 를 가지는 보오텍스 선 요소 dl 에 의한 임의의 점 (x, y, z) 에서의 유기속도 $\Delta \vec{q}$ 는 Biot-Savart 법칙에 의하여 식(8)로 구할 수 있다(Chung et al. 1998, Katz et al. 1991).

$$\Delta \vec{q}(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \Gamma(x, y, z) \frac{r \times dl}{|r|^3} \quad (8)$$

식(7)의 두 번째 항은 소오스의 분포로 날개의 두께 영향만을 고려하므로, 유동제어판과 같이 얇은 판에서는 무시하여 보오텍스 분포만 고려한 와류격자법을 사용하여 유기속도를 얻을 수 있다.

유동제어판을 제외한 선체표면과 자유수면에는 소오스를 분포하여 유기속도를 구하였다.

4. 계산결과 및 고찰

본 연구의 목적은 선체표면에 유동제어판을 부착하였을 경우에 발생할 것으로 예상되는 유동 양상을 모형시험에 앞서 예측하고자 하는 것이며, 이를 위하여 유동 예측용 수치해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 수치해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 최근에 광범위하게 연구가 진행된 바 있는 컨테이너 선형인 KCS선형을 대상선형으로 선택하였으며, KCS선형의 선미부에 유동제어판을 여러 가지 경우의 수를 가정하여 부착하고 수치해석을 수행하였다. 그리고 그 결과들을 서로 비교 검토함으로써 본 연구에서 적용한 수치해석 모델이 물리적으로 타당한 지를 검토하였다.

수치해석에 사용된 컴퓨터는 Intel Core2Quad CPU에 4Giga의 RAM을 장착하여 수행하였다. 계산에 사용된 패널의 수는 선체표면(4169개), 유동제어판(168개) 그리고 트랜섬 이후 영역을 포함한 자유수면(3382개)에 총 7719개의 패널을 분포하였다. 비선형자유수면 경계조건을 만족시키기 위한 반복계산을 수행한 결과 총 5번의 반복계산과정을 거쳐 비선형 자유수면 경계조건을 만족하는 범위내에 오차가 들어왔으며, 계산에 사용된 시간은 10분 25초이다.

4.1 적합한 유동제어판의 계산패널개수 변화에 따른 해석 결과

패널법을 사용하여 수치해석을 수행할 경우에 먼저 유동 계산에 적합한 패널 개수를 알아야 한다. 특히 본 연구와 같이 선체 크기에 비하여 상대적으로 상당히 작은 크기를 가지는 부가물을 부착할 경우에 이에 대한 검토는 매우 중요하다.

본 절에서는 유동 계산에 적합한 패널 개수를 찾기 위하여 유동제어판의 코드(chord)와 스팬(span)의 길이는 2m로 고정하였으며, 유동제어판에 분포될 패널수를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하여 조파저항계수, 선수와 선미의 침하량이 어떻게 변화하는지를 관찰하였다. 수치해석 결과의 일관성을 얻기 위하여 유동제어판 부근을 제외한 선체표면의 패널 분포는 최대한 유사한 분포를 유지하고자 하였다.

Fig. 2는 유동제어판에 12×12개의 패널을 분포한 경우에 유동제어판과 그 부근의 선체표면에서의 패널 분포를 나타낸 것이다.

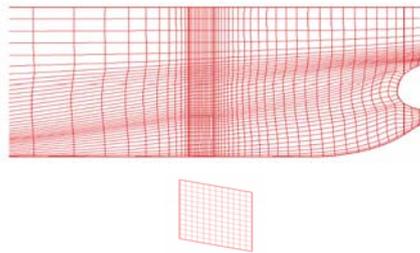


Fig. 2 Panel distributions near and on the plate

Fig. 3은 유동제어판에 분포한 패널 개수의 변화에 따른 조파저항계수(C_w)와 선수(FP)와 선미(AP)에서의 침하량(Z_s)을 비교한 것이다. 패널 개수가 증가하면서 계산 값들이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 12×12개의 패널을 분포하였을 때 선수와 선미에서의 침하량은 수렴한 것을 볼 수 있는 반면 조파저항계수는 아직 수렴하지 않은 것을 볼 수 있다. 패널법에 있어서 패널 개수는 많을수록 좋지만 컴퓨터 메모리의 한계, 수치해석의 문제 등으로 인하여 주의 깊게 검토해야 할 항목이다.

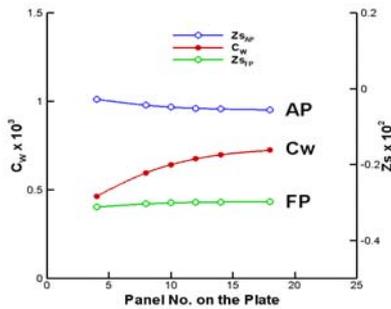


Fig. 3 Convergence of coefficient of wave making resistance, sinkage at FP & AP

4.2 유동제어판의 코드와 스펠길이 변화에 따른 해석 결과

선박에 유동제어판과 같은 부가물을 부착할 경우에 되도록 작은 것을 설치하는 것이 여러 가지

관점에 있어서 유리하다. 본 절의 연구 목적은 유동제어판의 적합한 크기를 찾는 것이며, 이를 위하여 Table 1에서와 같이 유동제어판의 제원을 바꾸어가면서 수치해석을 수행하였다.

앞 절에서 설명한 바와 같이 수치해석 결과의 일관성을 유지하기 위하여 선체표면의 패널 분포는 그대로 유지하고 유동제어판의 크기만을 식(1)과 같이 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다.

Table 1 Chord length vs. span length

Span Length \ Chord Length	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
1.0m	○	○	○	○
1.5m	○	○	○	○
2.0m	○	○	○	○

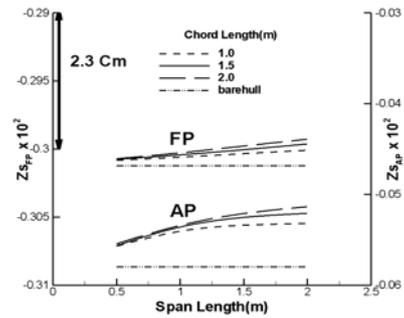


Fig. 4 Sinkage at FP & AP

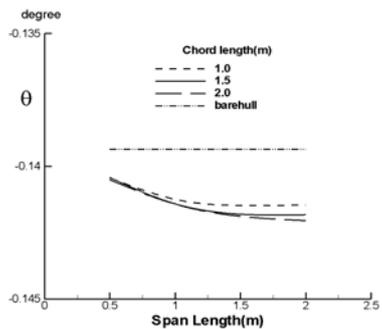


Fig. 5 Trim angle(θ)

Fig. 4와 5는 유동제어판의 코드와 스펠의 길이를 서로 변경시켜가면서 수치해석을 수행한 후 얻

은 선수와 선미에서의 조파저항계수와 침하량, 트림을 비교한 것이다. 유동제어판을 부착하지 않은 경우와 비교하여 유동제어판을 부착하였을 때 유동제어판에 상 방향으로의 양력이 발생하여 전반적으로 선체가 들리는 현상, 즉 배수량이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 선미부에 부착된 유동제어판의 영향으로 선미에 비하여 상대적으로 선수가 가라앉는 선수트림이 발생하는 것을 알 수 있다. 선수트림이 심하면 심할수록 조파저항계수가 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 코드와 스패의 길이가 길어지면서 그와 같은 현상은 더욱 두드러짐을 알 수 있다.

4.3 유동제어판의 적합한 부착위치 변화에 따른 해석 결과

앞 절들에서는 적합한 유동제어판의 제원 선정에 대하여 알아보았다. 이 절에서는 적합한 유동제어판의 부착위치에 대하여 알아보려고 한다.

유동제어판의 적합한 부착 위치를 찾기 위하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 선미부에 규칙적으로 15개의 유동제어판을 분포하였다. 수치해석은 15 번을 수행하였는데 서로 다른 하나의 유동제어판만을 부착하여 수치해석을 수행하였다.

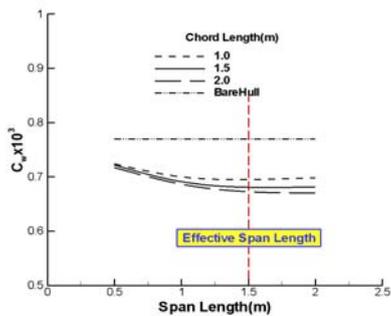


Fig. 6 Coefficient of wave making resistance

수치해석에 사용된 격자는 Fig. 7에 보는 바와 같이 초기에 선체표면과 15개의 유동제어판들에 대하여 계산 격자를 생성한 후 다시 다 떼어내고 각 단계마다 하나씩 붙여가면서 수치해석을 수행하였다. (A,1)은 길이방향으로 3st이고, 흡수방향으로 z/T=-0.43인 위치에 부착한 유동제어판을

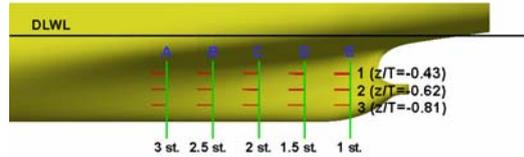


Fig. 7 Plate attachment location

나타내며, (D,2)는 길이방향으로 1.5st이고, 흡수 방향으로 z/T=-0.62인 위치에 부착한 유동제어판을 나타낸다. 유동계산에 사용된 선체표면의 패널의 개수는 5219개의 패널을 사용하였으며, 자유수면에는 길이 방향으로 180개, 폭 방향으로 18개의 패널을 사용하였다. 그 외 패널생성과 관련된 정보는 Choi et al.(2006, 2008)을 참조하기 바란다. 유동제어판의 제원은 코드가 2m이고 스패인 1.5m인 것을 사용하였으며, 패널의 분포는 코드방향으로 12개, 스패방향으로 10개의 패널을 분포하여 유동해석을 수행하였다.

Fig. 8과 9는 서로 다른 유동제어판의 위치에 따른 조파저항계수와 선수와 선미에서의 침하량과 트림을 비교한 것이다. Fig. 10과 11에서 볼 수 있는 바와 같이 유동제어판이 선체 중심에서 선미 쪽으로 가깝게 갈수록 선수트림이 커지는 현상이 나타나며 조파저항계수도 줄어드는 것을 알 수 있다. (E,3)에 유동제어판을 부착한 경우를 (D,3)에 부착한 경우와 비교하였을 때 선체의 중앙부에서 더 멀리 떨어져 있음에도 불구하고 트림과 조파저항계수가 증가한 것을 볼 수 있는데 이는 유동제어판의 존재로 인하여 유동이 stern bow 아래로 빠르게 흐르게 되고 이로 인하여 압력이 감소하여 선체가 아래로 가라앉는 현상이 발생하며 조파저항계수도 증가한 것으로 생각된다.

4.4 유동제어판의 적합한 양력각 변화에 따른 해석 결과

이 절에서는 적합한 유동제어판의 부착각도에 대하여 알아보려고 한다. Fig. 6의 (E,2)의 위치에 유동제어판의 후연(trailing edge)을 고정하고 유동제어판의 부착각도를 변경시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 계산에 사용된 유동제어판의 길이

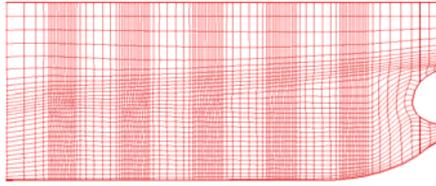


Fig. 8 Panel distribution near the plate

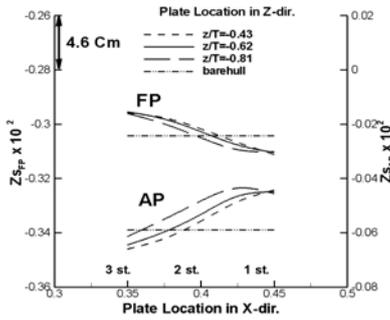


Fig. 9 Sinkage at FP & AP

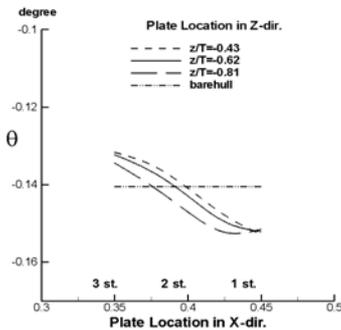


Fig. 10 Trim angle(θ)

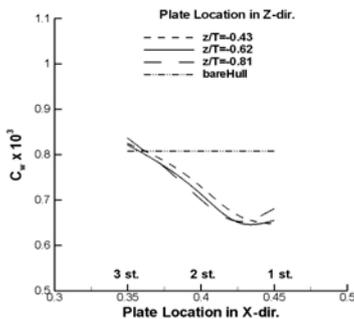


Fig. 11 Coefficient of wave making resistance

가 1m이고 폭이 1m인 평판을 사용하였으므로 폭 장비(AR)는 1이다. 유동제어판의 분포한 패널 개수는 폭 방향 6개, 길이방향 6개의 패널을 각각 사용하였다.

Fig. 12은 서로 다른 부착각도에 따른 유동제어판의 모양을 옆에서 본 것이다. 부착 방식은 후연을 고정하고 전연(leading edge)을 반시계방향으로 회전하는 각도를 양으로 잡았으며, 0도에서부터 30도까지 5도씩 각을 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다.

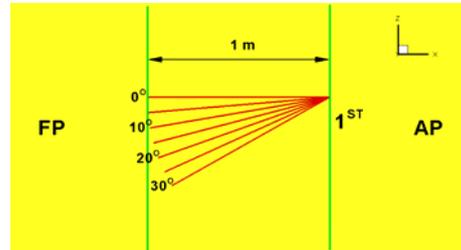


Fig. 12 Plate attachment with different attack angle

Fig. 13은 서로 다른 부착각도에 대하여 유동제어판주위 선체표면에서의 압력분포, 유속벡터 그리고 유선을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 부착각도가 0도인 경우에는 유입 유동의 유입각으로 인하여 유동제어판의 아래 부분이 압력면이 되고 부착각도가 10도의 근처에서는 유동제어판에 의한 유선의 교란이 거의 없어지는 것을 볼 수 있으며 부착각도가 10도를 넘으면서 유동제어판의 윗부분이 압력면이 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14에서 16까지는 선수와 선미에서의 침하량과 트림 그리고 조파저항계수를 서로 비교한 것이다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 부착각도가 10도 부근에서는 유동제어판에 의한 유선의 교란이 거의 없는 것을 볼 수 있으며 이로 인하여 선수 선미의 침하량과 조파저항계수도 기준선과 비교하여 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 유동제어판의 부착각도가 커지면서 선미트림이 발생하며 조파저항계수가 커지는 것을 알 수 있다.

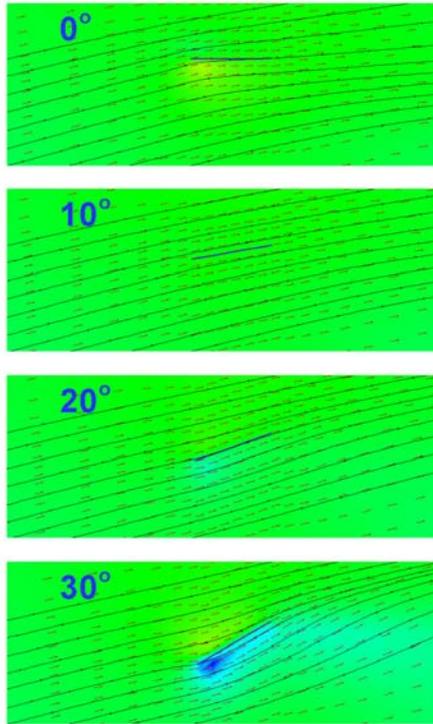


Fig. 13 Comparison of coefficient of dynamic pressure & streamline and velocity vector

5. 결론

본 연구에서는 선미 유동 제어 장치로서 선미에 양력을 발생시키는 부가물인 유동제어판을 부착하였을 경우에 유동제어판이 선체에 미치는 영향을 유체역학적 관점에서 고찰하고자 하였다. 선미부의 유동이므로 점성영향을 고려해서 유동을 해석해야 하겠지만 현실적으로 선체의 자세를 변경시켜가면서 선체주위의 점성 유동장을 계산한다는 것이 그리 쉽지 않으며, 보다 실용적으로 점성 유동장을 고려한 수치계산을 수행하고자 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구의 목적은 유동제어판을 부착하였을 때 선체의 자세가 어떻게 변화하고 그에 따라 조파저항계수가 어떻게 변화하는지를 포텐셜 유동해석을 사용하여 해석해 보고자 하였다. 유동제어판의 부착으로 인한 선체의 거동을 예측할 수 있는 수치

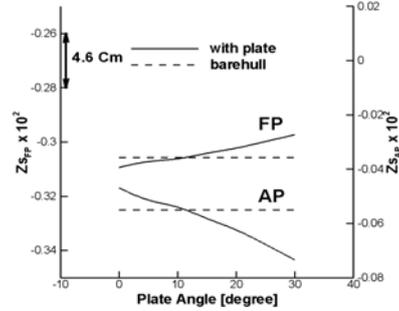


Fig. 14 Sinkage at AP & FP

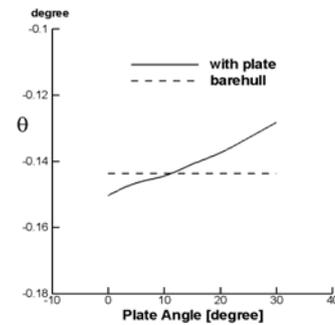


Fig. 15 Trim angle(θ)

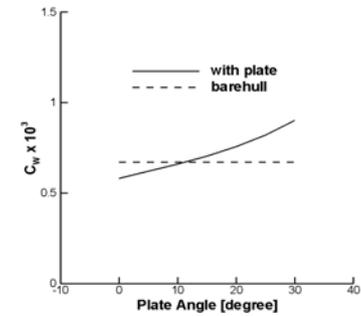


Fig. 16 Coefficient of wave making resistance

해석 프로그램을 개발하기 위하여 패널법과 와격자법을 사용하였다.

개발된 수치해석 프로그램의 검증을 위하여 선체표면에 여러 가지 경우에 대하여 유동제어판을 부착하고 그에 대한 수치해석을 수행하였으며 그 결과를 비교 검토함으로써 개발된 프로그램의 타

당성을 검증하고자 하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 여러 가지 매개변수적 수치해석 결과를 근거로 볼 때 본 연구를 위하여 개발된 수치해석 프로그램이 물리적으로 타당한 결과를 준다는 것을 알 수 있었다.
2. KCS 선박의 경우 선수트림이 발생함으로 인하여 조파저항계수가 감소하는 것을 볼 수 있었다.
3. 수치해석 결과에 대한 타당성의 정성적 검증 뿐 아니라 정량적인 검증을 위하여 모형시험이 필요할 것으로 생각된다.

이상의 결과를 근거로 하여 본 연구를 위하여 개발한 수치해석 프로그램은 유동제어판을 부착한 선박주위 유동 예측을 위한 수치해석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- Broadley, Ian and Garry, Kevin, 1997 "Effectiveness of Vortex Generator Position and Orientation on Highly Swept Wings," AIAA-97-2319.
- Choi, H.J., Kim, J., Van, S.H., Park, I.R. and Kim, K.S., 2006, "Panel Cutting Method a New Approach in Hull Surface Panel Generation," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 6, pp. 638-646.
- Choi, H.J., Kim, J., Van, S.H., Park, I.R. and Kim, K.S., 2008, "Variable Free Surface Panel Method for Potential Flow Analysis around a Ship," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp. 54-62.

- Chung, K.H., Chang, J.H. and Chun, H.H., 1998, "A Study on the Performance of the Wing In Ground Effect by a Vortex Lattice Method," Journal of The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 87-96.
- Katz, J. and Plotkin, A., 1991, Low Speed Aerodynamics From Wing Theory to Panel Methods, McGraw-Hill, New York.
- Lee, C.J., Park, I.R., Lee, Y.H. and Byeon, S.H., 2004, "A Study on the Performances Affected by Vortex Generator for DWT 40,000Ton Product Carrier," Proceedings of the Annual Meeting, SNAK, Sancheong, 20-22 October, pp. 257-263.
- Wendt, B.J. and Reichert, B.A., 1996, "The Modelling of Symmetric Airfoil Vortex Generators," AIAA Paper 96-0807.



< 최희중 >



< 전호환 >



< 윤현식 >



< 이인원 >



< 박동우 >



< 김동진 >