대 한 조 선 학 회 논 문 집
제43권 제6호 2006년 12월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 43, No. 6, pp. 667-674, December 2006

자유수면을 포함한 사각기둥의 횡동요 유체동역학 수치해석

김진†*, 김수환*, 김광수*, 박일룡*, 반석호*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

A RANS-based Simulation for the Prediction of Hydrodynamic Rolling Moments around Rectangular Cylinders with Free Surface

Jin Kim†*, Suwhan Kim*, Kwang-Soo Kim*, Il-Ryong Park* and Suak-Ho Van*

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI*

Abstract

Accurate prediction of ship dynamics, particularly roll motion, is very important in ship safety. In the past, empirical or vortex based methods were commonly used for the hydrodynamic roll damping predictions but they could not be applied to practical ship roll motion cause of limitations about geometries and design conditions. Recently RANS-based techniques are developed for the practical ship motion analysis. In this study, RANS based roll analysis about a rectangular cylinder with WAVIS developed by MOERI/KORDI are performed and compared with the experimental data and other RANS results.

※Keywords: Roll motion(횡동요), Hydrodynamic coefficient(유체동역학 계수), Rectangular cylinder(사각 기둥), CFD(계산유체역학), Free surface(자유수면)

1. 서 론

물 위를 항해하는 배는 파도와 바람 등에 의해 여러 유형의 운동을 하며 횡동요도 그 중 하나이다. 배가 좌우 어느 한쪽으로 최대로 기운 뒤 반대쪽으로 움직이기 시작하는 순간 마스트, 굴뚝 등 높이 솟아있는 장치와 배의 중심축으로부터 멀리 떨어져 있는 물품들은 여전히 같은 방향으로 움직이려는 관성력을 갖게 되고, 순간적으로 큰 하중을 받아 막대한 손상을 입을 수도 있다. 이와 같이 선체 운동 중 일반적으로 가장 심각한 고려대상이 되는 횡동요 운동을 정확히 예측하는 것은 선박의 안정성에 매우 중요한 역할을 한다.

초기의 횡동요 예측을 위한 연구 중에서 Ikeda et al.(1978)은 횡동요 감쇄를 크게 마찰저항, 조파저항, 소용돌이(eddy), 선체 양력 및 빌지 키일(bilge keel) 감쇄로 구분하였으며, Himeno(1981)는 부가물에 의한 감쇄 효과와 선박 고유의 감쇄 효과로 구분하여 각각의 실험식을 제안하였지만,

접수일:2006년 10월 17일, 승인일:2006년 11월 17일
†교신저자: jkim@moeri.re.kr, 042-868-7216

특정 형상에 대한 제한된 범위에서 성립하는 식으로서 일반적인 형상에는 적용하기 어려운 단점이 있었다. 또, Ikeda and Himeno(1981), Scolan and Faltinsen(1994) 등은 보오텍스(vortex) 기법을 이용한 점성 유동의 해석을 시도하였지만 이러한 방법들도 정체점(separation point) 정보를 알아야하므로 실제 선박 문제에 적용하기 어려웠다. 기존의 실험식이나 보오텍스 기반 기법들이 지닌 한계를 극복하기 위하여 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 기반 해석 기법들이 연구되기 시작하였다. Korpus and Falzarano(1997)은 자유 수면을 고려하지 않고 RANS 해석을 수행하였으며, Gentaz et al.(1997) 등은 자유 수면을 고려한 해석을 수행하였으나 물리적으로 타당한 수준의 값을 얻는데 실패하였다. 1999년 Jouette et al.(1999)은 3차원 선형의 횡동요 운동에 적용하여 물리적으로 타당한 값을 얻는 데는 성공하였으나 실험치와의 비교 등은 존재하지 않았다. 이후 Sarkar and Vassalos(2000)는 사각 기둥에 대한 RANS 해석을 수행하여 Yeung et al.(1998)이 실험한 실험치와 비교하여 RANS 기법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서는 한국해양연구원에서 김우전 등(2000)에 의해 개발된 선박 점성 해석 코드인 WAVIS(WAve and VIScous flow analysis system for hull form development)를 확장하여 사각 기둥에 대한 횡동요 해석을 수행하였고 기존 결과와 비교 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1. 지배방정식

물체고정좌표계에서 비압축성 점성유동의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2\vec{u} + \vec{S} \quad (1)$$

$$\vec{S} = -2\vec{\omega}\times\vec{u} - \vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{u}) - \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r} \quad (2)$$

여기서 $\vec{u}$ 는 유체 속도벡터로서 (u, v, w)를 나타내며, $\vec{\omega}$는 물체의 각속도(angular velocity) 벡터 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$를, p는 압력을 나타낸다. $\vec{S}$는 비정상(unsteady) 운동을 물체고정좌표계를 이용하여 격자의 이동 없이 해석을 수행하고자 할 경우 생성되는 생성항으로서 식(2)와 같이 표현된다. 식(2)의 우변의 항들은 각각 코리올리스(Corilois) 가속도, 구심(centripetal) 가속도, 각(angular) 가속도를 나타낸다.

위의 지배방정식을 수치적으로 해석하기 위하여 시간항에 대한 시간적분법은 2차의 Euler implicit 법을 사용하였으며, 운동량 이송 방정식의 대류항과 확산항은 3차의 MUSCL (Monotonic Upstream Centered Scheme for Conservation Laws)과 중앙차분법을 이용하여 각각 이산화 하였다. 속도-압력의 연성을 위해서 SIMPLEC방법을 사용하였으며, 이산화된 선형연립방정식의 해는 SIP(Strongly Implicit Procedure)기법을 사용하여 구하였다. 점성 해석을 위한 난류모델로는 realizable k-ε 모델을 사용하였다.

2.2. 자유 수면 해석 기법

자유수면의 움직임을 해석하기 위해 박일룡 등(2005)이 제안한 Hybrid VOF(Volume capturing method)법을 사용하였다. Hybrid VOF법은 기존의 VOF법과 Level-Set법에서 Level-Set 함수분포를 재구성하는 과정을 결합한 방법이다. Hybrid VOF법은 기존 VOF법과는 달리 유동장의 초기 유체체적 비율 c에 대한 분포 정의를 명확히 할 수 있으며, 유동현상이 심한 영역과 격자간격이 불균일하고 직교성(orthogonality)이 대체로 낮을 경우 유체체적 비율 c의 번짐(smearing) 현상이 2~3개 격자수 이상의 영역으로 확대되어 해의 정도가 감소되는 단점을 가진 기존 VOF법을 개선한 방법이다.

격자내 속도와 압력 등의 물리량이 대표되는 계산점에 물과 공기가 그 격자내 차지하는 체적비율을 임의 변수 c를 사용해서 저장할 수 있다. 격자가 물로 완전히 채워진 경우 $c=1$이며, 공기만 채워진 경우 $c=0$의 값을 갖는다. 격자내 자유수면이 포함된 일반적인 경우를 모두 고려하면 $0 \le c \le 1$이어야 한다. 격자내 자유수면의 위치는 $c=0.5$

인 지점이 된다. 두 유체의 밀도와 점성은 c의 함수로 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\rho(c) = \rho_w c + \rho_a(1-c)$$
$$\mu(c) = \mu_w c + \mu_a(1-c) \quad (3)$$

여기서, (ρ_w, μ_w), (ρ_a, μ_a)는 각각 물과 공기의 밀도와 점성을 나타낸다. 주어진 속도장에 대해 변수 c의 움직임은 다음의 식을 통해 구한다.

$$\frac{d}{dt}\int_\Omega c d\Omega + \int_S c u_i n_i dS = 0 \quad (4)$$

식(4)를 이산화하기 위하여 박일룡과 전호환(2002)이 사용한 HRIC(High Resolution Interface Capturing)법을 사용하였다.

매 계산시간 동안 변수 c분포를 2개의 격자이내에서 $0 \le c \le 1$ 조건을 유지시키기 위해 Level-Set법에서 사용되는 다음의 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = sgn(\phi_o)(1 - |\nabla \phi|) \quad (5)$$

여기서 τ는 가상시간(dummy time)을 나타내고, ϕ는 유체체적 비율 c분포를 자유수면으로부터의 거리함수(distance function)로 변환한 함수이며, ϕ_o는 주어진 시간(t)에서의 함수ϕ의 초기조건을 나타낸다. 식(5)의 시간적분은 Euler explicit법을 사용하고, 우변은 2차 정도의 ENO법으로 이산화하였다(박일룡 등 2004).

3. 사각 기둥의 횡동요 해석

3.1 횡동요 감쇠 계수의 계산

지배방정식의 해석을 통해 얻어진 모멘트는 크게 유체동력학적(hydrodynamic) 모멘트와 유체정력학적(hydrostatic) 모멘트로 구성된다. 이 중 횡동요 감쇠 계수를 구하기 위해서는 유체동력학적 모멘트가 필요하다. 일반적인 유체동력학적 모멘트는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$M_w(t) = \int p(n_y z - n_z y) ds + \int r \times \tau ds \quad (6)$$

여기서 n_y n_z는 사각 기둥 표면에서 수직한 방향의 성분이고, τ는 미소영역 ds에 작용하는 전단응력을 나타낸다. 위의 모멘트를 퓨리에 변환을 통해 부가 관성 모멘트(added moment of inertia)와 감쇠 모멘트(damping moment)로 각각 분리한다.

$$A_{44}(t) = \frac{1}{\pi a_0 \omega}\int_{t-T/2}^{t+T/2} M_w(t)\sin(\omega t)dt \quad (7)$$
$$B_{44}(t) = \frac{1}{\pi a_0}\int_{t-T/2}^{t+T/2} M_w(t)\cos(\omega t)dt$$

위의 모멘트는 다음과 같은 무차원화 된 계수로 나타낼 수 있다.

$$a_{44} = \frac{A_{44}}{\rho A b^2} \quad (8)$$
$$b_{44} = \frac{B_{44}}{\rho A b^2}\sqrt{\frac{b}{2g}}$$

여기서 ρ는 밀도를, b는 사각 기둥의 폭을, A는 사각 기둥의 단면적을 나타내며, a_0는 횡동요 진폭을 의미한다.

3.2 사각 기둥 횡동요 해석 조건

Fig. 1과 같이 본 연구에서 해석한 사각 기둥은 크기가 0.4m x 0.4m 이며, 빌지 반지름이 폭의 0.665%와 2%의 2가지 경우에 대하여 수치해석하였다. 자유 수면은 사각 기둥의 중심 높이와 같은 곳에 존재하며, 사각 기둥은 5.75도와 11.5도의 두 진폭에 대하여 강제 횡동요 운동을 한다고 설정하였다. 이는 Young et al.(1998)의 실험조건과 동일하다. 또한 각 진폭에 대하여 0.4에서 1.2까지의 각속도 영역에서 해석을 수행하였으며, 이 경우 레이놀즈수는 약 16000에서 144000의 영역에 존재하게 된다.

Fig. 2는 해석에 사용한 격자계를 보여주고 있으며 사각 기둥을 해석하기 위하여 약 46000개의 격자점을 8개의 블록으로 분할하여 병렬 해석을 수행하였다. 비정상 해석을 위한 시간 간격은 0.00025초로 설정하여 각 경우에 대하여 20000번까지 계산하였으며, 실제 시간으로는 0초에서 5초

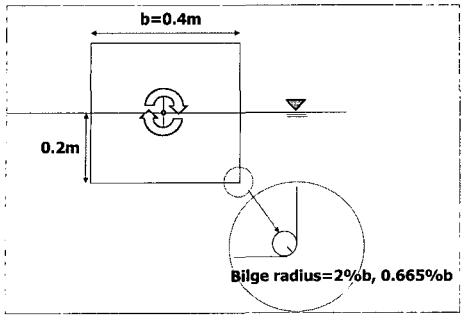


Fig. 1 Rectangular cylinder

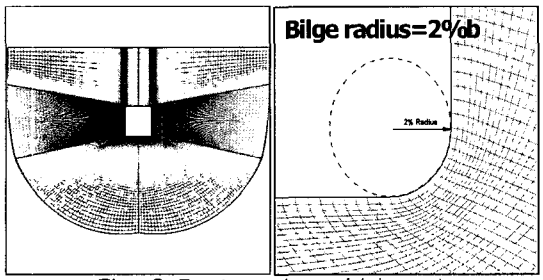


Fig. 2 Rectangular grid layout

까지 비정상 해석을 수행하였다. 이 때, 인텔 P4 3.2GHz 8대의 CPU를 이용하여 병렬을 수행할 경우 약 12만초(33시간)정도 소요되었다.

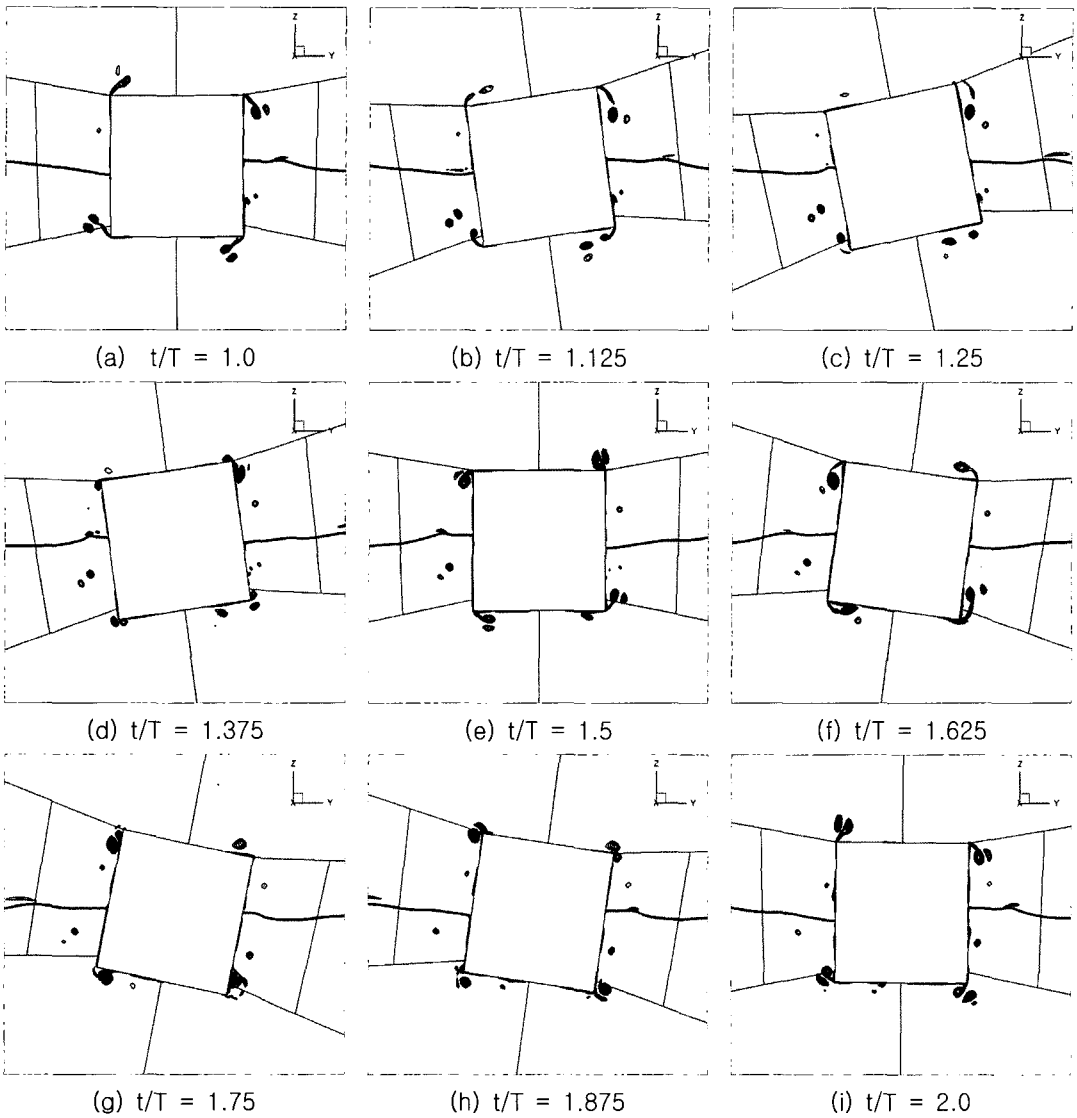
3.3 사각 기둥 해석 결과

Fig. 3은 진폭 11.5도, 빌지 반지름이 0.665%, 각속도가 1.2인 사각 기둥의 강제 횡동요시 빌지 주변에서의 와류분포(vorticity)를 나타낸 그림이다. 사각 기둥의 강제 횡동요가 1주기 운동을 한 이후 다음 1주기까지 운동을 각 시간 단계에 따라 나타내었다. 우선 t/T=1.0(0도)인 경우 빌지에서 강한 보오텍스가 발생한 것을 볼 수 있다. t/T=1.125(5.75도)에서는 앞 단계에서 발생한 보오텍스가 사각 기둥에서 떨어져 나가고 새로운 보오텍스가 발생하기 시작한다. 이후 t/T=1.25(11.5도)를 지나 사각 기둥의 횡동요 진행 방향이 반대가 될 때(t/T=1.375) 이전에 발생한 보오텍스가 사각 기둥에서 멀리 떨어져 나가기 전 다시 사각 기둥과 부딪히게 된다. 이러한 보오텍스의 충돌은 사각 기둥 표면에서의 유체역학적 압력 크기의 변화를 발생시키고, 사각 기둥에 작용하는 마찰힘을 변화시키게 된다. 보오텍스와 사각 기둥의 충돌은 사각 기둥의 횡동요 방향이 바뀌는 시점에서 발생하며, 이 때 횡동요 모멘트의 비선형성이 발생한다. Fig. 4는 빌지의 반지름과 사각 기둥의 각속도에 따른 모멘트의 비선형성을 나타내는 그림이다. Fig. 4 (a)는 빌지 반지름 2%이고 진폭이 5.75도인 경우의 모멘트 곡선으로서 사각 기둥의 방향성이 바뀌는 t/T=1.25 부근에서 약간의 비선형성이 발생하지만 그 이후 모멘트의 큰 비선형성은 보이지 않는다. 하지만 빌지 반지름이 2%이고 진폭이 11.5도인 Fig. 4 (b)의 경우 Fig. 4 (a)와는 달리 t/T=1.25와 1.75 이후에 뚜렷한 비선형성이 나타남을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 4 (c)의 경우 빌지 반지름이 0.665%, 진폭이 11.5도인 경우는 빌지 반지름 2.0%인 경우보다 더 큰 보오텍스가 발생하므로 Fig. 4 (b)보다 더 큰 비선형성을 나타낸다. 특히, t/T=2.5 부근에서는 보오텍스와 사각 기둥의 상호작용이 더욱 크게 발생하여 그림과 같은 이중 봉우리의 모멘트를 볼 수 있었다. 이러한 형상은 Fig. 3을 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 3을 보면 시간이 진행됨에 따라 빌지에서 발생한 보오텍스가 바로 소멸되지 않고 계속 수중에 남아 있는 것을 볼 수 있으며, 그 보오텍스의 개수와 크기도 시간이 지남에 따라 점점 늘어나는 것을 볼 수 있다. 이렇게 증가한 보오텍스 덩어리가 t/T=2.5를 전후하여 사각 기둥과 충돌하면서 사각 기둥의 큰 면적에 걸쳐 영향을 준 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5는 횡동요 모멘트에 직접적인 영향을 주는 인자를 찾기 위하여 사각 기둥에 작용하는 힘을 나타낸 것이다. 사각 기둥에 작용하는 힘으로 측면 방향으로 작용하는 유체동역학적 압력힘 (hydrodynamic pressure force) C_{PY}, 높이 방향으로 작용하는 유체동역학적 압력힘 C_{PZ} 측면 방향으로 작용하는 마찰힘(friction force) C_{FY} 높이 방향의 마찰힘 C_{FZ}로 나누어 표현하였으며, 모멘트 및 힘은 아래와 같이 무차원화 하였다.

$$\overline{M} = \frac{M}{\alpha_0^2 \omega^2 b^4}$$

$$\overline{F} = \frac{F}{\alpha_0^2 \omega^2 b^3} \qquad (9)$$

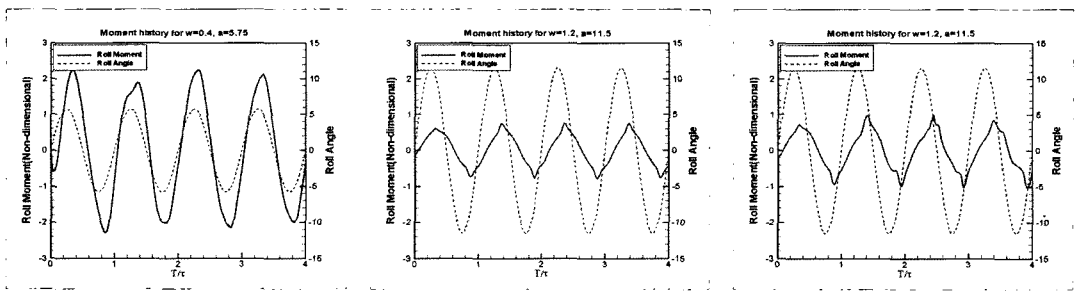


(a) t/T = 1.0 (b) t/T = 1.125 (c) t/T = 1.25

(d) t/T = 1.375 (e) t/T = 1.5 (f) t/T = 1.625

(g) t/T = 1.75 (h) t/T = 1.875 (i) t/T = 2.0

Fig. 3 Vorticity Contours in roll motion(α_0=11.5°, ω=1.2)



(a) α_0=5.75, ω=0.4, r=2%b (b) α_0=11.5, ω=1.2, r=2%b (c)α_0=11.5,ω=1.2,r=0.665%b

Fig. 4 Nonlinearity of hydrodynamic roll moment

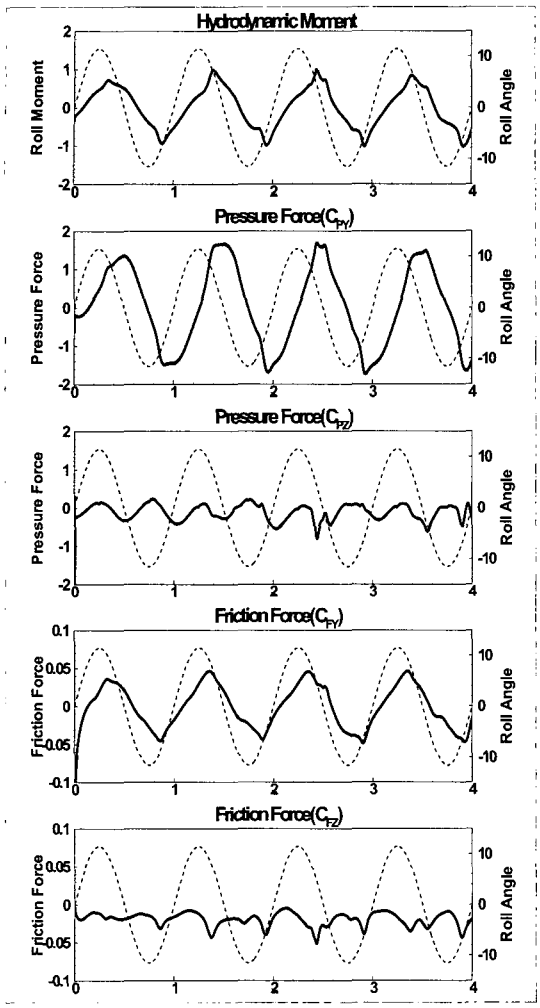
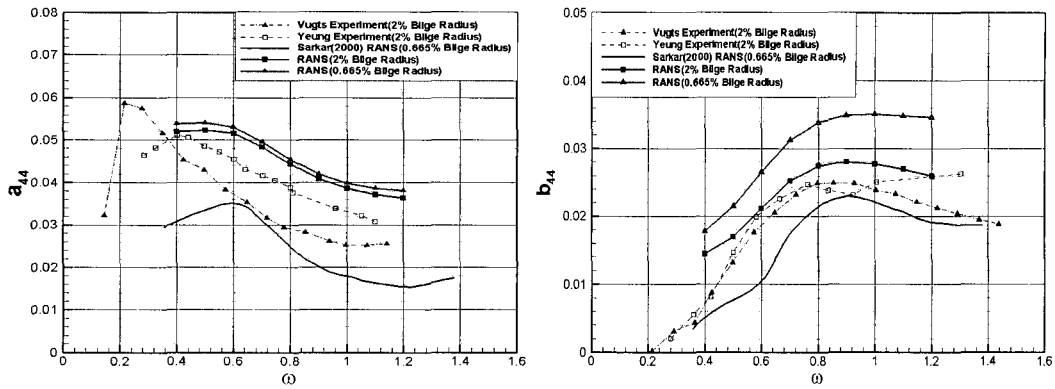


Fig. 5 Roll motion due to hydrodynamic forces(α0 = 11.5, ω=1.2, bilge 0.665%b)

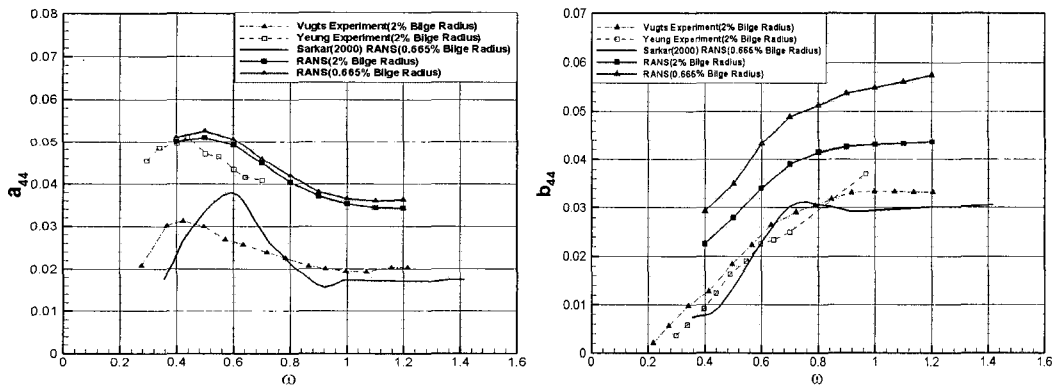
Fig. 5에서 횡동요 모멘트와 유사한 패턴을 보이는 힘으로는 측면 방향의 유체동역학적 압력힘 C_{PY}와 마찰힘 C_{FY}를 들 수 있으며, 부력 방향의 힘들은 사각 기둥의 빌지 주변의 보오텍스와의 충돌이 일어나는 경우 패턴의 변화를 나타내었다. 그리고 유체동역학적 압력힘과 마찰힘을 비교하면 유체동력학적 압력힘이 거의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 동일한 무차원화를 한 경우 유체동역학적 힘은 -1.5 ~ 1.5 의 크기를 갖는 반면 마찰힘은 -0.05 ~ 0.05의 힘을 갖는다. 즉, 사각 기둥에 작용하는 힘은 95% 이상이 유체동역학적 힘임을 알 수 있다. 즉, 보오텍스와 사각기둥 간의 상호작용이 발생할 때, 사각 기둥 표면에서의 압력의 변화가 모멘트의 비선형성에 가장 큰 영향을 준 것으로 예측할 수 있었다.

Fig. 6과 Fig. 7은 부가 관성 모멘트 계수와 횡동요 감쇠 계수를 진폭에 따라 계산한 결과이다. 비교 대상으로는 2%의 빌지 반지름에 대한 사각기둥의 Vugts 및 Yeung의 실험결과와 빌지 반지름 0.665%에 대한 Sarkar의 RANS 해석 결과를 비교하였다. Fig. 6은 진폭이 5.75도인 경우로서 Fig. 7의 진폭 11.5도인 경우에 비해 상대적으로 횡동요 감쇠가 작은 영역이다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 실험치와 비교하면 부가 관성 모멘트 계수가 실험치에 비하여 조금 높게 나오지만 Yeung의 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그에 반하여 Sarkar의 계산 결과는 빌지 반지름이 0.665%로 실험모델(2%)보다 작기 때문에 더 큰 보오텍스의 발생으로 인하여 실험치보다 큰 값이 나와야 하지만 전체적으로 부가 관성 모멘트 뿐만 아니라 횡동요 감쇠 계수도 매우 낮은 값을 예측하였다. 이는 사각 기둥에서 발생하는 보오텍스의 제대로 예측하지 못한 것으로 크게 두 가지 문제점을 예상해 볼 수 있었다. 우선 Sarkar의 경우 사각 기둥의 격자를 표현하는데 있어서 8000개의 해석 격자만을 사용한 것을 들 수 있다. Sarkar가 사용한 8000개의 격자점은 자유 수면과 사각 기둥을 동시에 표현하기에는 매우 부족한 격자수로서, 적은 수로 자유 수면을 표현하기 위하여 큰 자유수면 두께를 적용하였으며, 이 때문에 자유 수면에 의한 힘의 변화를 정확히 예측하지 못한 것을 예측할 수 있다. 또 다른 하나의 원인으로는 비정상 운동을 해석하기 위한 시간 전진 간격을 너무 크게 설정하였다. 본 연구에서는 한 단계 전진하기 위하여 실제 시간으로 0.00025초를 설정하였으며, 총 5초를 전진하기 위하여 20000번의 해석을 수행하였다. 하지만 Sarkar의 경우 시간 전진 간격을 0.01초로 설정하고 4초까지 전진하는데 있어서 400번의 해석만을 수행하였다. 너무 큰 시간 전진 때문에 빌지에서 발생하는 보오텍스들을 정확히 모사하지 못하였을 뿐만



(a) Added moment of inertia coefficient (b) Damping moment coefficient

Fig. 6 Hydrodynamic coefficients (α_0 = 5.75)



(a) Added moment of inertia coefficient (b) Damping moment coefficient

Fig. 7 Hydrodynamic coefficients (α_0 = 11.5)

아니라 시간의 흐름에 따른 보오텍스와 사각 기둥 간의 상호작용이 감소하여, 횡동요에 의한 감쇠 효과가 작아진 것으로 생각할 수 있다. Fig. 6과 Fig.7에서 빌지 반지름의 크기에 따른 부가 관성 모멘트와 횡동요 감쇠 특성은 다음과 같다. 우선 부가 관성 모멘트의 경우 빌지 반지름이 작을수록 부가 관성 모멘트가 줄어드는 효과가 있지만 크게 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 횡동요 감쇠 계수는 빌지 반지름에 매우 민감하며 보오텍스가 크게 발생하는 0.665%인 경우가 더욱 크게 나타났다. 이는 보오텍스와 사각 기둥과의 상호작용이 크게 일어날수록 감쇠 특성이 좋아지는 것을 의미한다. 이는 선박의 횡동요 감쇠를 위하여 빌지 키일을 설치하는 것과 동일한 물리적 의미를 가진다. 즉, 빌지 키일을 설치할 경우 판 끝에서 발생하는 큰 보오텍스로 인하여 선박 표면과의 상호작용이 크게 발생하게 되고 이러한 과정을 통해 빌지 키일이 없는 선박보다 더욱 큰 횡동요 감쇠 계수를 갖게 된다.

4. 결 론

본 연구는 선박의 조종 성능과 안정성에 큰 영향을 미치는 횡동요를 정확히 예측하기 위한 기초 연구로서 사각 기둥에 대한 자유 수면이 존재하는 횡동요 해석을 수행하였다. 본 연구는 기존의 실

험 결과와 비교하여 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, Sarkar 등의 RANS 해석 결과보다는 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구를 통해 사각 기둥에서 발생하는 보오텍스의 영향에 따른 횡동요 감쇠 현상을 파악하고 횡동요 감쇠에 영향을 주는 인자들에 대하여 살펴보았다. 향후 본 연구를 통해 개발된 횡동요 예측 기술을 이용하여 실제 선박에 대한 횡동요 예측을 수행할 수 있을 것으로 예상한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 "선박의 유체성능 고도화 기반 기술 개발" (PN00930)의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 김우전, 김도현, 반석호, 2000, "유한체적법을 이용한 상선주위의 난류유동 계산에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 19-31.
- 박일룡, 김진, 반석호, 2004, "Level-Set법을 이용한 일반상선의 저항성능 해석," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 2호, pp. 63-73.
- 박일룡, 김진, 반석호, 김우전, 2005, "VOF법의 자유수면 포착정도 향상을 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 88-98.
- 박일룡, 전호환, 2002, "자유표면을 가지는 점성 유동장 내의 기포거동에 관한 기초해석," 대한조선학회 논문집, 제 29권, 제 1호, pp. 16-27.
- Gentaz L., Alessandrini B., and Delhommeau G., 1997, "Motion Simulation of a Two Dimensional Body at the Surface of a Viscous Fluid by a Fully Coupled Solver," 12th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, pp. 85-89.
- Himeno Y., 1981, Prediction of Ship Roll Damping: State of Art, University of Michigan, Department of Naval Architecture, Report No. 239, Ann Arbor.
- Ikeda Y., Himeno Y., and Tanaka, N., 1978, A Prediction Method for Ship Roll Damping, Report No. 00405 of the Department of Naval Architecture, University of Osaka Perfecture.
- Ikeda Y. and Himeno Y., 1981, "Calculation of Vortex-shedding Flow around Oscillating Circular and Lewis-form Cylinder," Proceedings of the Third International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics.
- Jouette C. Laget O., and Gouez J.M., 1999, Vers la Tenue a la Mer des Navires par Une Formuation en Fluide Visqueuz," 7e Journees De L'Hydrodynamique.
- Korpus R.A. and Falzarano J.M., 1997, "Prediction of Viscous Ship Roll Damping by Unsteady Navier-Stokes Techniques," Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 119, pp. 108-113.
- Sarkar T. and Vassalos D., 2000, "A RANS-based Technique for Simulation of the Flow near a Rolling Cylinder at the Free Surface," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 5, pp. 66-77.
- Scolan Y.M. and Faltinsen O., 1994, "Numerical Studies of Separated Flow from Bodies with Sharp Corners by the Vortex in Cell Method," Journal of Fluids and Structures, Vol. 8, pp. 201-230.
- Yeung R.W., Liao S.W. and Roddier D., 1998, "On Roll Hydrodynamics of Rectangular Cylinder," Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 3, pp. 445-453.

< 김 진> < 김 수 환 > < 김 광 수 >

< 박 일 룡 > < 반 석 호 >