

# 선수주위 쇄파현상의 수치시뮬레이션에 관한 기초연구

엄 태 진<sup>1\*</sup>, 이 영 길<sup>2</sup>, 정 광 열<sup>3</sup>

## A FUNDAMENTAL STUDY ON THE NUMERICAL SIMULATION OF WAVE BREAKING PHENOMENON AROUND THE FORE-BODY OF SHIP

T.J. Eom, Y.-G. Lee and K.-L. Jeong

*Wave breaking phenomenon near the fore body of a ship is numerically simulated. The ship advance with uniform velocity in calm water. For the simulation, incompressible Navier-Stokes equations and continuity equation are adopted as governing equations. The simulation is carried out in staggered variable mesh system with finite difference method. Marker and Cell(MAC) method and Marker-Density method are employed to track the free surface. Body boundary conditions are satisfied with the adoption of porosity method and no-slip condition on the hull surface. The ship model has a wedge type fore-body, and the computational domain is an appropriate region around the fore-body. The computation results are compared with some experimental results. Also the difference of the free surface tracking methods are discussed.*

**Key Words:** 자유표면(Free Surface), 쇄파(Breaking Wave), 유한차분법(Finite Difference Method), 이층류 유동(Two-Phase Flow), 밀도함수법(Marker-Density Method)

### 1. 서 론

배가 항주할 때 나타나는 조파현상과 조파저항은 속도가 높을수록 커지며, 고속선의 경우에는 전체저항의 반 이상을 조파저항이 차지하기도 한다. 쇄파현상은 조파저항에 영향을 미치고, 오랜 기간 동안 선박에 있어서 중요한 연구대상이 되어 왔다. MAC(Marker And Cell)법이 최초로 직사각형 격자계를 사용하여 자유표면을 포함한 비압축성 유동을 계산 하는데 사용되었다[1]. 뒤를 이어 Chan과 Street[2]는 동역학적 조건을 보다 엄밀하게 적용하였다. MAC법에서는 자유표면에 가상의 점들을 띄워 놓게 되며, 이러한 가상의 점들을 매 시간단계마다 이동시키는 방법에 의하여 자유표면을 표현할 수 있게 된다. 그 후, VOF(Volume Of Fluid)법[3] 및 밀도함수법(Marker-Density)[4]은 MAC법에서 계산이 어려운 쇄파나 기포

거동에 대한 시뮬레이션을 가능하게 하였다.

쇄파현상에 대한 연구는 여러 방향으로 수행되어 왔다. Vanden Broeck 와 Tuck[5]은 흘수가 낮은 선박의 3D 접근법을 이용한 쇄파 시뮬레이션에 대하여 연구하였다. Mori[6]는 불규칙적인 자유수면에서 발달하는 선수파에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구의 목적은 선수의 쇄파현상을 수치계산을 통하여 예측하는데 있다. 수치계산은 MAC법과 밀도함수법을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 계산결과는 수조실험을 통해 얻은 결과와 비교하였다. 또한 MAC법과 밀도함수법의 차이를 비교해 보았다. 선박의 선수부는 단순한 쐬기모양을 하고 있으며, 선미부는 직사각형모양으로 단순하다. 선수부 만을 계산 영역으로 설정하였으며, 속도를 변화시키며 계산을 수행하였다. 계산시간, 컴퓨터의 메모리용량 등으로 인하여 격자의 개수에 제약이 있으므로 유동변화가 심한 선체주위의 격자의 크기를 작게 하고, 이로부터 떨어진 곳에서는 점차적으로 격자의 크기를 크게 함으로써 같은 수의 격자를 사용하여도 보다 정도 높은 계산결과를 얻을 수 있도록 하였다.

1 인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공 학부생  
2 정회원, 인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공  
3 학생회원, 인하대학교 대학원 선박공학과

\* Corresponding author E-mail: tjeom3504@yahoo.co.kr

2. 모형실험

실험에 사용된 선박은 Fig. 1과 같이 wedge형 선수를 가지고 있으며 직사각형 모양의 선미를 가지고 있다. 쇄파현상을 촉진하기 위하여 선수입사각을 크게 하였고, 선체의 어깨에 각을 주어 어깨파의 비선형성이 크도록 하였다.

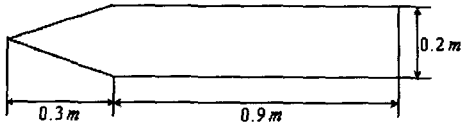


Fig. 1 Schematic view of test model

Table. 1 Principle dimension of test model

Description	Model
Length	1.20 m
Beam	0.10 m
Depth	0.15 m
draft	0.08 m

실험은 인하대학교 선형수조실험실에서 수행되었으며, 속도는 0.5m/s~1.0m/s 범위에서 0.1m/s간격으로 수행되었다.

3. 수치 계산법

3.1 MAC법

3.1.1 지배방정식 및 차분법

지배방정식은 유동장을 비압축성, 비점성유동이라고 가정하여, 보존형의 3차원 Euler equations와 연속방정식을 사용하였다.

지배방정식의 차분화에 있어서는, 대류항을 제외한 나머지 항들은 시간에 대하여 전진차분, 공간에 대하여 2차중심차분으로 이산화 하였다. 대류항의 차분기법으로는 2차중심차분과 donor cell법을 조합한 hybrid scheme을 적용하였다.

3.1.2 경계조건

물체경계에서는 free-slip조건을 적용하였다. 물체경계에서의 압력 반복계산식은 free-slip조건과 연속조건을 동시에 만족시키면서, 동시반복기법을 이용하여 계산하였다.

자유수면조건으로는 점성응력과 표면장력의 효과를 무시하였으며, 자유수면의 운동학적, 동역학적 조건은 식(1), (2)와 같이 각각 사용하였다.

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + w \quad (1)$$

$$p = p_0 \quad (2)$$

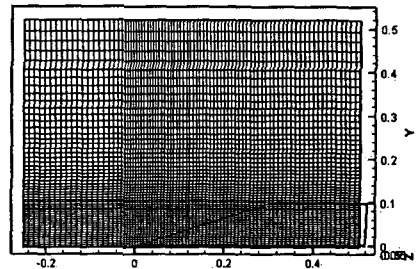
위 식의  $p_0$ 는 대기압을 나타내며 상수이며,  $\xi$ 은 파고를 나타낸다.

식(1)에 의해 표현된 운동학적 조건은 자유수면상에 놓여진 marker를 이용하여 만족되어진다. Marker들은 Lagrangian manner로 움직이며, 매 시간단계에서 새로운 위치가 자유수면의 위치를 정의한다.

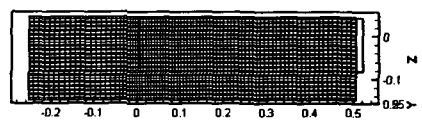
계산조건은 Table. 2과 같으며 선체주위의 격자크기를 작게 하여 계산의 정도를 높였다.

Table. 2 Computational conditions about MAC method

Number of Cell	X	85
	Y	60
	Z	40
Computational domain	X	0.75m
	Y	0.52m
	Z	0.2m
Cell Size	$X_{min}$	0.006
	$Y_{min}$	0.004
	$Z_{min}$	0.005
Time steps for acceleration		1500



(a) X-Y plan

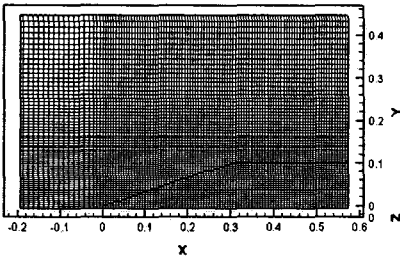


(b) X-Z plan

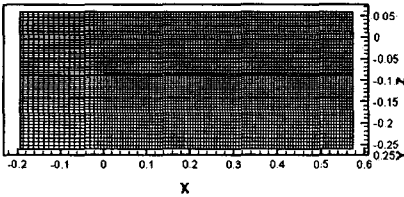
Fig. 2 Computational domain about MAC method

Table. 3 Computational condition for marker-density method

Number of Cell	X	110
	Y	65
	Z	65
Computational domain	X	0.75m
	Y	0.55m
	Z	0.32m
Cell Size	X <sub>min</sub>	0.006
	Y <sub>min</sub>	0.0045
	Z <sub>min</sub>	0.004
Time steps for acceleration		2800



(a) X-Y plan



(b) X-Z plan

Fig. 3 Computational domain for marker-density method

### 3.2 밀도함수법

#### 3.2.1 지배방정식 및 차분법

지배방정식으로는 2층류의 비압축 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 사용하였다. 2층류 유동 계산에서는 물과 공기가 각각의 영역에서는 균일한 밀도를 가진 것으로 가정하였고, 표면장력과 점성응력은 무시하였다.

지배방정식은 시간에 대해서는 전진차분법으로, 공간에 대해서는 중심차분법에 의해 균일하지 않은 격자 크기를 가지는 교차격자계에서 이산화 되었다. 단, 대류항은 3차의 상류차분에 의해 구해지며, 1차 상류차분법은 인접한 격자의 수가 제한되어 있을 때에만 이용된다. 압력의 Poisson 방정식은 SOR법에 의하여 반복 계산된다.

#### 3.2.2 경계조건

자유수면상에서 운동학적 조건으로 액체와 기체의 입자속

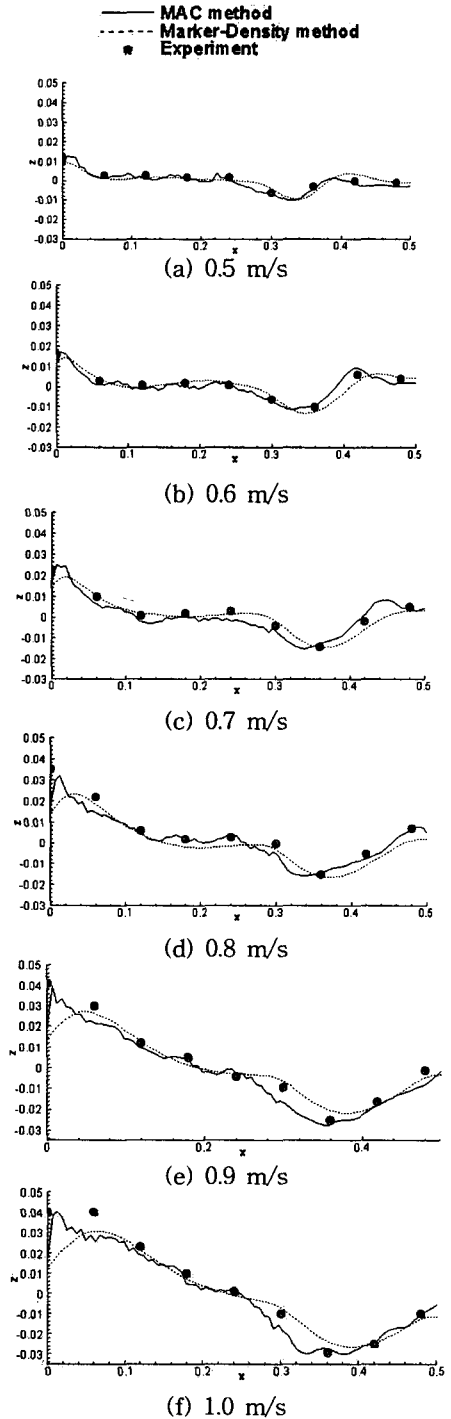
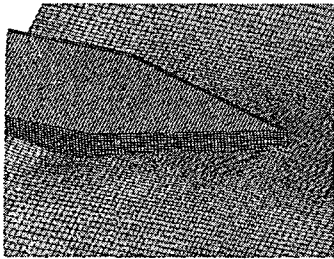
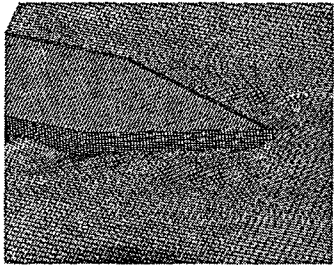


Fig. 4 Comparison of the wave profiles along the hull surface

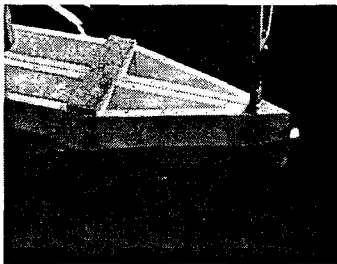
도가 같다고 하였다. 운동학적 경계조건을 만족시키기 위하여



(a) MAC method

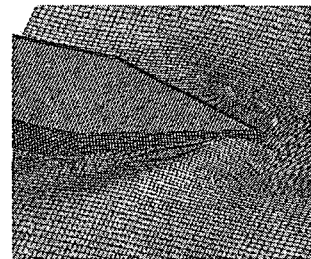


(b) Marker-Density method

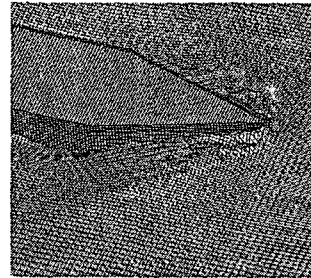


(c) Experiment

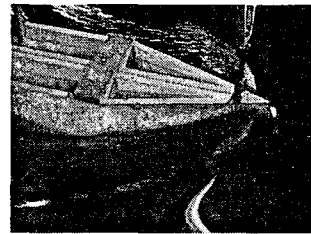
Fig. 5 Perspective view (0.6m/s)



(a) MAC method



(b) Marker-Density method



(c) Experiment

Fig. 6 Perspective view (1.0m/s)

밀도함수법을 적용하였다. 밀도가 다른 2층류로 이루어진 문제의 경우 각 유체의 밀도는 비압축성의 조건이므로 일정하다고 가정하였다. 밀도함수 값은 각각 밀도의 스텝라 값으로부터 정의되었으며, 각 격자의 Marker-Density 변화는 식(3)에서와 같이 밀도함수로 정의되었다. 자유수면의 위치는 밀도함수의 중간지역에서 적절한 위치가 결정되었다. 그러나 밀도함수법은 자유수면 정의에만 사용되며 지배방정식의 계산에는 실제 밀도값이 사용된다. 자유수면에서의 액체와 공기의 압력은 같다.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + u \frac{\partial M_p}{\partial x} + v \frac{\partial M_p}{\partial y} + w \frac{\partial M_p}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$p = p_{air} \quad (4)$$

역학적 경계조건으로는 식(4)와 같이 자유수면상의 액체와 기체의 압력은 같다고 하고, 표면장력은 무시하였다. 역학적 경계조건을 만족시키기 위하여 irregular leg lengths and star기

법이 압력 Poisson 방정식 계산 과정에 사용되었다. 압력의 Poisson 방정식에서 격자 간격과 이웃하는 격자의 압력점에서의 압력 대신에 leg length와 경계면에서의 압력이 사용되었다. 계산에서 경계면의 압력은 이웃한 구역의 유체유동에 종속되어 있기 때문에 경계면에서의 압력은 근접한 격자들로부터 경계면의 압력을 외삽하여 결정하였다. 수평방향으로는 등치외삽법(equivalent extrapolation)을 사용하였고, 수직방향으로는 중력가속도를 고려하여 선형외삽법(linear extrapolation)을 사용하여 경계면의 압력을 결정하였다. 또한 경계면 주위에서 미분항의 계산을 위하여 경계면의 각도가 45° 보다 클 경우에는 구하려는 구역에서 이웃한 구역까지 수평적으로 외삽하여 속도를 구하였다.

계산조건은 Table. 3와 같다. 계산시간을 줄이고 계산의 정도를 높이기 위해 선체에서의 X, Y, Z-방향 격자의 크기는 각각 0.006m, 0.0045m, 0.004m로 하고, 선체에서 멀어질수록 점점 커지도록 하였다. 밀도함수를 이용한 시뮬레이션의 계산 영역은 Fig. 3와 같다.

#### 4. 결과 및 고찰

시뮬레이션의 정도검증을 위하여 실험을 통해 얻은 선측파형과 각각의 계산결과로부터 얻은 선측파형을 Fig. 4와 같이 비교해 보았다. 속도가 낮은 영역에서는 MAC법을 이용한 결과와 밀도함수를 이용한 결과 모두 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 속도가 증가함에 따라 선수에서 파고가 증가하는 것을 볼 수 있다. 고속영역에서는 MAC법에 비하여 밀도함수를 이용한 결과가 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 특히 선수부의 급격한 파고의 증가를 잘 시뮬레이션 하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 Perspective view를 나타내고 있다. 저속영역인 0.6m/s의 경우실험결과에서 쇄파현상이 나타나지 않으며, 밀도함수법을 이용한 결과와 MAC법을 이용한 결과 모두 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

고속영역인 1.0m/s에서의 실험결과에서 보면 발산파의 쇄파현상을 관찰 할 수 있다. MAC법을 이용한 결과와 비교하면 발산파가 실험결과에 비하여 뒤쪽에서 발생하며 발산파가 매끄럽게 나타나는 것을 볼 수 있다. 밀도함수법에 의한 계산결과를 실험결과와 비교해 보면 발산파의 표면이 매끄럽지 않고 실험에서와 같은 쇄파현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

#### 5. 결 론

선박의 고속화로 인하여 선체주위의 쇄파현상은 선박저항의 중요한 요인이 되고 있다. 본 연구에서는 MAC법을 이용한 결과와 밀도함수법, 모형실험의 결과를 비교하여 수치기법의 정도를 확인하였다. MAC법으로는 구현하지 못했던 쇄파현상을 밀도함수법을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 그 실험결과와 정성적, 정량적으로 일치함을 확인하였다. 본 연구에 사용된 수치기법들 중 밀도함수법은 쇄파현상이 일어나는 고

속 선박의 저항연구에 활용 가능성을 확인하였다.

수치기법의 활용도를 높이기 위하여 선미를 포함한 유동의 시뮬레이션이 가능하도록 code의 보완이 필요하다. 또한 극심한 비선형성을 보이는 overturning 현상과 reattching 현상을 포함하는 유동의 시뮬레이션을 위한 기법의 발전이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 특정기초과제인 "선박주위의 쇄파현상에 대한 수치시뮬레이션기법의 개발"의 일부분으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Welch, J.E. et al., 1966, "The Mac Method", Los alamos Scientific lab. Report LA-3425, Los Alamos.
- [2] Chan, R.K.-C. and Street, R.L., 1970, "SUMMMAC-A Numerical Model for Water Wave", Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, Technical Report No.135.
- [3] Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for The Dynamics of Free Boundaries", J. Computational Physics, Vol.39, p.201-205
- [4] Park, J.-C. and Miyata, H., 1994, "Numerical Simulation of 2D and 3D Breaking Waves by Finite-Difference Method", J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol.175, p.11-24.
- [5] Vanden Broeck, J.-M. and Tuck, E.O., 1977, Proc. 2nd Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, Berkeley.
- [6] Mori, K.N., 1985, "Vortex and bow wave around blunt bodies", Proc. 13th Symp. Naval Hydrodynamics, Germany.