

부유식 해양구조물 주위의 쇄파현상을 동반한 3차원 비선형성 파의 수치해석

박 중 천* · 宮田 秀明**
(96년 6월 3일 접수)

Numerical Analysis of the Three-Dimensional Nonlinear Waves
Caused by Breaking Waves around a Floating Offshore Structure

Jong-Chun Park* · Hideaki Miyata**

Key Words : Three Dimensional Breaking Waves(3차원 쇄파), Floating Offshore Structure (부유식 해양구조물), Incident Gravity Wave(입사 중력파), Finite Difference Method(유한차분법), Navier Stokes Equation(나비에-스토크스 방정식), Two-layer Flow(2층류), Density-function Technique(밀도함수 기법), Porosity Technique(점유비 기법)

Abstract

Numerical simulation is made of the three-dimensional wave breaking motion about a part of a floating offshore structure containing a circular cylinder mounted vertically onto a lower hull in regular periodic gravity wave generated by a numerical wave maker. TUMMAC-VIII finite-difference method is newly developed for such a problem. By use of density-function technique the three dimensional wave breaking motion is approximately implemented in the framework of rectangular grid system. A porosity technique is devised for the implementation of the no slip body boundary conditions. The generation of breaking waves by the interaction of incident waves with the structure is well simulated and interesting features of breaking waves are revealed with containing degree of quantitative and qualitative accuracy.

1. 서 론

반잠수식 해양구조물, 해상도지, 해상공항과 같은 해양구조물 등의 공학적인 설계와 그 안전성을 고려해 보면, 그러한 구조물 등에 미치는 파랑 외

력을 정확히 예측하고 평가하지 않으면 안된다. 미소한 진폭의 진행 규칙파에 의한 반잠수식 해양구조물 전체에 작용하는 파력의 추정에는, 적절한 점성수정을 덧붙인 포텐셜 이론의 계산에 따른 방법이나, 혹은, 해양구조물의 각 부재요소를 2

* 한국기계연구원 선박·해양공학연구센터

** 東京大學 工學部

차원 주상체로 취급하는 Hooft의 방법¹⁾ 등이 이용된다. 하지만, 해상상황의 극한상태(survival condition)와 같이, 규칙파의 진폭이 구조물의 직경에 비해 상대적으로 커지게 되면 비선형성이 강한 파동운동이 중요해지며, 종래의 방법으로는 비선형성이 강한 파동운동을 설명하기 어렵다. 극한상태의 해상은 해양구조물의 설계조건으로써, 이러한 상태하에 놓인 해양구조물 주위의 비선형적인 유체역학적 특성을 파악하는 것은 중요한 일이지만, 그 강한 비선형성에 대한 이론적 해석의 어려움때문에 연구대상으로써 많이 취급되지 않았다.

본 연구에서는, 극한상태에 준하는 큰 파랑중의 복잡한 해양구조물 주위의 3차원 쇄파를 동반한 비선형성 파동운동을, Navier-Stokes 방정식을 직접 푸는 TUMMAC-VIII 유한차분법^{2,3,4)}에 의해 수치계산하고, 본 방법에 의한 비선형성 유체역학적 특성의 추정법이 어느 정도까지 유효한가 검토한 후, 유동장의 특성을 살펴 부유식 해양구조물의 설계상에 필요한 정보 제공을 목적으로 한다.

2. TUMMAC-VIII 유한차분법의 구성

2.1 지배방정식 및 계산의 알고리즘

두 층에 있어서, 두 종류의 유체가 각각 일정한 밀도를 갖고, 비압축성이며, 연속적이라고 가정하면, 지배방정식은 이하에 표시하는 2층류에 관한 비압축성의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이 된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad , \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho^{(1)}} \nabla p + \mathbf{a}^{(1)} \quad , \quad (2a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho^{(2)}} \nabla p + \mathbf{a}^{(2)} \quad . \quad (2b)$$

단,

$$\mathbf{a} = \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad . \quad (3)$$

여기서, 윗첨자 <1>과 <2>는 자유표면의 하부와 상부의 유체를 각각 표시한다. 본 연구에서, <1>은 자유표면 아래의 물, <2>는 그 위의 공기

로 각각 가정한다. ∇ 는 gradient operator, \mathbf{u} 는 속도벡터, p 는 압력, t 는 시간, ν 는 동점성 계수, \mathbf{f} 는 중력항을 포함한 외력항이다.

기본적인 해의 알고리즘은 MAC법에 기초한 TUMMAC-VIII 유한차분법이며, 물과 공기에 대해서 식(2)를 푸는 2층류 계산을 행하고 있다.

두 유체는 자유표면을 경계로, 상하로 나뉘어져 있다고 가정하며, 상술한 지배방정식의 해는, time-marching 과정의 매 시간 스텝에서 각 유체 영역에 있어서 분리적으로 행함으로써 얻어질 수 있다. 이때, 밀도 ρ 는 각 층에 있어서 일정하다고 가정한다.

자유표면의 형상은, 자유표면의 경계조건인 역학적 조건과 운동학적 조건에 의해 결정된다.

2.2 차분 근사식

본 연구에서는, 세 방향 모두 부등간격 격자를 사용하고, 그에 따라 계산의 정도를 높이기 위해 대류항의 차분에는 격자간격을 고려한 3차의 차분 근사식을 도입해 수치오차의 증가를 억제한다⁵⁾. 확산항의 공간 차분에는 2차의 중심차분을 사용한다. 한편, 시간미분에는 전진차분법을 적용한다.

2.3 쇄파운동을 포함한 비선형 자유표면의 조건

자유표면 운동에 물의 중력적 작용이 거의 지배적일 경우, 자유표면상의 점성응력과 표면장력이 무시된다고 가정하면⁶⁾, 자유표면에 관한 역학적 조건과 운동학적 조건은 다음과 같다.

$$p^{(1)} = p^{(2)} \quad , \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_\rho}{\partial t} + u \frac{\partial M_\rho}{\partial x} + v \frac{\partial M_\rho}{\partial y} + w \frac{\partial M_\rho}{\partial z} = 0 \quad . \quad (5)$$

여기서, M_ρ 는 밀도함수(density-function), u, v, w 는 각각 x, y, z 방향에 있어서의 속도 성분이다. 식(5)는 자유표면상의 유체입자는 자유표면의 운동 후에도 자유표면에 존재한다는 것의 의미이며, 파의 overturning 운동이나 쇄파운동과 같은 비선형성이 강한 자유표면 운동도 표현 가능하다. 밀도함수의 값은 각 격자에 주어진 스칼라량이

며, 두 층의 유체의 밀도를 각각 $\rho^{(1)}, \rho^{(2)}$ 라 했을 때, $M_\rho = (\rho^{(1)} + \rho^{(2)}) / 2$ 의 값을 갖는 위치를 두 유체의 경계면으로 정의한다. Navier-Stokes 방정식에 의한 유동장의 계산에서는, 두 유체의 경계면보다 하측영역(물)에서의 밀도를 $\rho^{(1)}$, 상측영역(공기)의 밀도를 $\rho^{(2)}$ 로, 일정한 값으로써 두 유체를 분리해 취급한다.

식(5)의 차분에는, 시간 미분항에 2차정도의 Adams-Bashforth법을, 공간 차분에 대해서는 flux-split법의 MUSCL과 같은 3차정도의 상류차분을 이용한다.

한편, 자유표면의 역학적 조건인 식(4)는, 압력의 Poisson 방정식의 해를 구하는 단계에서 Chan & Street(1970)의 "irregular star" 법에 의해 만족시킨다.

자유표면 경계상에서의 속도는, 자유표면의 법선 방향에 제로 구배가 되도록 근사적으로 외삽^{2,3)}하며, 다른 층의 경계조건이 된다.

2.4 3차원 임의의 형상 물체의 no-slip 경계조건

복잡한 3차원 임의의 형상 물체를 표현하기 위해, 하나의 격자에 유체가 점유하는 비율인 점유비(porosity) γ 라는 스칼라량을 이용한다^{7,8)}. 단, 점유비 γ 는 $0 \leq \gamma \leq 1$ 의 값을 취하고, 격자의 flagging 또는 차분근사에 필요한 다리 길이의 계산 등, 물체표면의 조건 처리에 사용하게 된다. 또한, 물체표면에 수직한 단위법선 벡터는, 주변 격자의 점유비에 의해 근사적으로 어렵잡는다.

2.5 그 외의 경계조건

유입경계에서는, 경계 격자에서 적당한 속도분포를 고정적으로 부과하게 되며, 이로 인해 조파를 행하고 있다. 유출경계는, 반사파의 영향을 최대한 줄일 수 있도록 부가영역의 설치와 수치적인 damping scheme²⁾을 적용한다. 천정과 바닥조건은, 자유표면 근방에서의 유체운동이 수치구조의 천정과 바닥에 영향을 미치지 않도록 자유표면으로부터 충분히 떨어지도록 설정하고, 각 물리량은 법선구배가 영이 되도록 외삽한다. 또한, 양측면의 경계조건은, 계산영역의 일부를 겹쳐 내삽하는 주기 경계조건(cyclic boundary condition)을 부

과한다.

3. 수치 계산

3.1 계산 모형의 선정

Fig. 1에 보이는 바와 같이, lower hull 위에 무수히 장착되어 있는 원주들의 안쪽 한 부분을 포함하는, 부유식 해양구조물 부채의 1/70 크기의 모형을 계산대상으로 선정한다. 파는 lower hull의 90° 옆 방향에 부딪히는 상태를 가정하고, lower hull 위의 원주와 원주사이의 유체력의 상호간섭에 의한 영향에 대해서는, 측면경계에 주기조건을 부과하는 것으로 고려한다. Fig. 2에는, 모형의 치수와 계산에 이용되는 격자계를 표시한다. Lower hull의 단면은 타원이며, 장축과 단축의 길이의 비는 3:1이고, lower hull의 몰수도(lower hull의 타원의 단축의 길이에 대한, 정수면부터 lower hull의 상면까지의 깊이의 비)는 1로 한다. 원주의 직경은 216(mm)로, lower hull 폭의 36%에 해당하고, 수면을 관통하고 있다. 계산영역은, 540 mm의 협소한 폭을 갖는 채널(channel) 형상이 되며, 그 채널의 폭을 바꿈으로써 원주와 원주 사이의 간격을 바꾸어 주는 것이 된다. 본 연구에 있어서는, 실제의 설계상태보다 협소한 폭을 계산조건으로 가정했다.

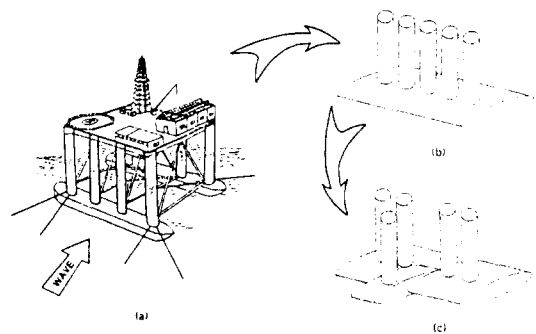


Fig. 1 Schematic sketch of selection to the floating offshore structure model.

3.2 계산 조건

계산 조건을 Table 1에 표시한다. 계산영역의 유

입경계에 설정되어 있는 수치 조파기로부터는, 파장 4.2m, 진폭 0.09m의 2차원적인 주기파가 조파되고 있다. 규칙파의 파장은 원주직경의 19.4배로, 계산영역 내에서는 한 파장의 일부분만이 계산된다. 또한, 파의 진폭은 lower hull의 물수도의 약 1/2이며, 물체로부터 파의 회절(diffraction)이 생기는 것을 고려해 볼 때, 매우 심각한 파의 비선형성 거동이 예상된다.

Table 1. Conditions of computation

Computational Region	
length (m)	2.1+20
width (m)	0.54
depth & height (m)	0.6 & 0.45
Grid Spacing	
longitudinal (min. size)	0.02 (m)
lateral (min. size)	0.02 (m)
vertical (min. size)	0.01 (m)
Number of Grid Points	
	125 × 30 × 105
Time Increment Δt(sec)	
	T/2400
Wave (in sea condition)	
length λ (m)	4.2 (294.0)
period T(sec)	1.714 (13.7)
height 2a (m)	0.18 (12.6)
parameter ax	0.135
Density	
$\rho^{<1>}$ (kg/m ³)	1000.0
$\rho^{<2>}$ (kg/m ³)	1.0
Kinematic Viscosity	
$\nu^{<1>}$ (m ² /sec)	1.0×10^{-6}
$\nu^{<2>}$ (m ² /sec)	1.5×10^{-5}

격자계는, Fig. 2에 표시한 바와 같이, 유체운동이 심할 것으로 예측되는 자유표면 근방에는 등간 격자격을 이용한다. 총 사용 격자 수는, 약 40만 격자이며, 실행 파일의 크기는 55MB정도이다.

파랑중의 물체와 주기파와의 상대이동거리를 나타내는 K_c (Keulegan-Carpenter) 수는, 원주의 직경 배이스로 1.1이다.

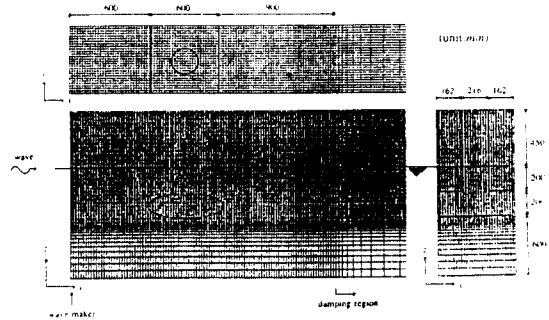


Fig. 2 Computational domain and cell division for a part of floating offshore structure model.

3.3 계산 결과

3.3.1 3차원 쇄파운동의 시간발전

Fig. 3는, lower hull과 원주의 후방에서 일어나

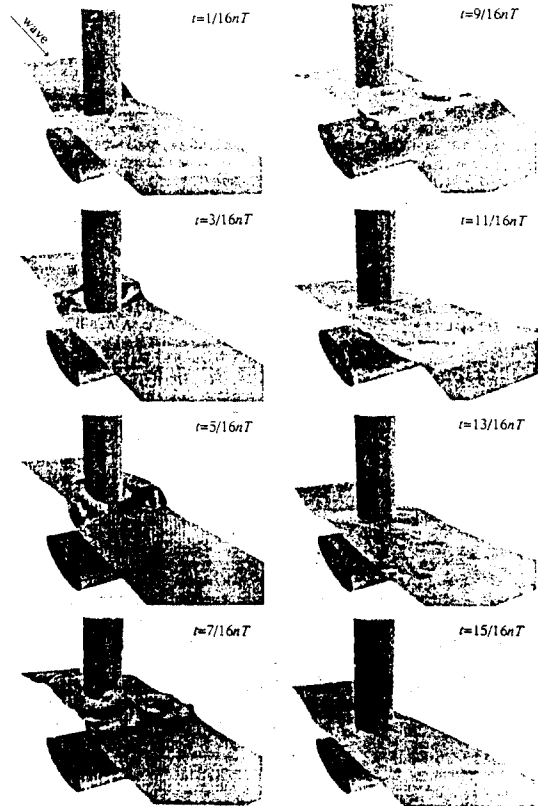


Fig. 3 Time sequences of wave elevation about a part of floating offshore structure model in incident waves of $\lambda=4.2m$.

는, 규칙파열의 쇄파운동을 포함한 3차원 파동의 1 주기 동안의 시간변동을 표시한다.

시각 $1/16nT$ 에 있어서, 원주의 후방에서 파면의 급경사(steeptness)가 보여진다. 시각 $3/16nT$ 에서, 파면은 더욱 경사가 급해지는데, 원주의 측면 가까이에서는 파의 쇄파운동이 시작되고 있다. 시각 $5/16nT$ 의 경우, 원주의 후방에서는, 흐름방향에 격심한 쇄파운동이 보여지고, 부분적으로는 원주 후반부의 단면형상에 따라 중심선을 향해서 무너져 내리고 있다. 이 경우, 쇄파는, 주로 lower hull에 의한 천수효과(shallow water effect)와 원주와 원주 사이의 상호간섭이 주된 원인이라고 생각할 수 있다. 시각 $7/16nT$ 에 있어서, 원주의 후방에서는 수위의 급격한 상승을 포함한 매우 복잡한 파운동이 나타나고 있다. 시각 $9/16nT$ 에서는, 원주의 후방에서 경사가 급한 파의 파징 형상이 보여지지만, 쇄파운동은 나타나 있지 않다. 따라서, 이 시각 이후부터는 심한 쇄파운동의 난류에 의한 산일과정(dissipative process)이 진행되고 있다고 생각할 수 있다⁹⁾.

3.3.2 물체-파/파-파의 상호간섭(Body-wave/wave-wave interaction)과 그 비선형성 거동

복잡형상 물체 주위의 다이내믹한 3차원 쇄파운동이, Fig. 3에서 실감나게 표시되었다. 특히, Fig. 3의 시각 $7/16nT$ 에 있어서, 원주의 후단에서 나타난 물기둥(水柱)과 같은 수위의 급한 상승은, 비선형성 파동운동의 3차원성을 표시하는 것으로 생각할 수 있다. 그 물리적 과정과 현상을 상세히 이해하기 위하여, Fig. 4, Fig. 5와 같이, 원주 후단의 2차원 단면에서 속도 벡터와 압력장의 시간 변화를 각각 살펴 보기로 한다. 시각 $4/16nT$ 에 있어서, 상류측으로부터 부서져 오는 쇄파운동에 의해, 파면이 多價함수로 나타난다. 시각 $5/16nT$, $6/16nT$ 에 있어서, 원주 후단의 중심선상의 자유표면 부근에서 흐름이 강하게 충돌하고, 자유표면의 상방에 굴절되는 모습이 표시된다. 이것은 원주의 양측면에서 원주의 측면형상에 따라 부서져 오던 파들 간의 충돌에 의한 것이며, 흐름은 lower hull의 존재에 의해 자유표면의 하방향에는 회절되지 않고, 자유표면 부근에 집중되어, 자유표면을 상승시키는 효과를 가져오게 된다. 시각 $7/16nT$ 에 있어서, 원주 후단의 중심

선 부근에서 파면의 불연속한 상승이 표시되고, 그 위치적인 불안정성에 의해, 시각 $8/16nT$, $9/16nT$ 에서는, turbulent bore와 같이 원주 후방 주위로 무너져 내린다. Fig. 5에 표시하는 것같이, 파-파의 상호간섭에 의해 원주의 후방에서 생긴, 파면의 상승 영역에는 높은 압력 영역이 만들어지고, 구조물은 이 압력변동의 영향을 받게된다.

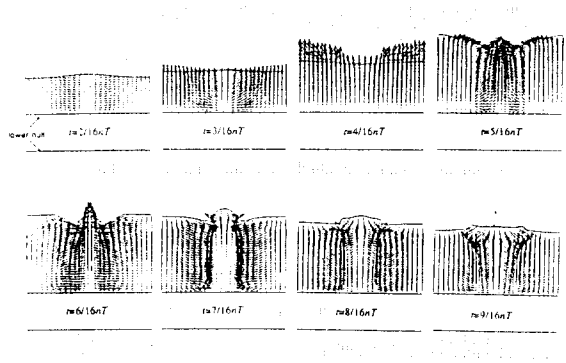


Fig. 4 Time sequences of wave elevation and velocity vector field on the plane of the aft-end of the vertical cylinder on the lower hull.

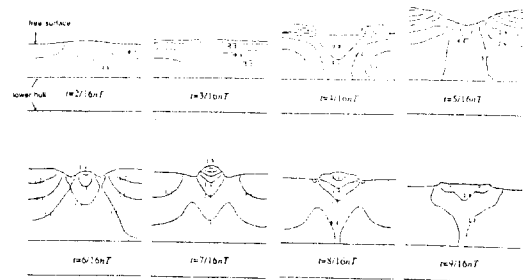


Fig. 5 Time sequences of pressure field on the plane of the aft-end of the vertical cylinder on the lower hull.

상술한, 원주후방에서의 복잡한 비선형성 거동은, Fig. 6에 보이는 바와 같이, 실험과 정성적으로 비교할 수 있다. 계산의 경우, 원주의 직경을 겨우 10등분하였기 때문에, 불연속적인 수위 상승의 형상이 다소 온화하게 표현되어 있지만, 수위의 상승 형태나 turbulent bore와 같이 무너져 내리는 모양은, 실험과 정성적으로 잘 일치한다고 볼 수 있다.

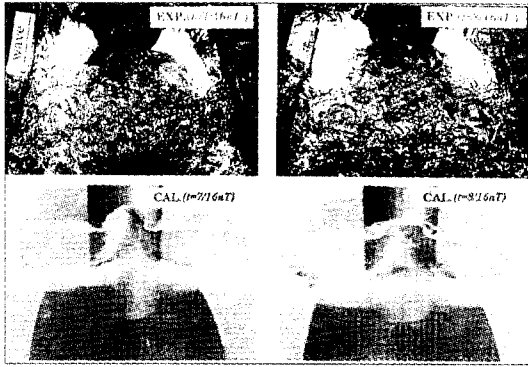


Fig. 6 Comparison of wave formations near the aft-part of the vertical cylinder on the lower hull.

3.3.3 국소 단면에서의 쇄파운동의 비선형성 거동

Fig. 7에 표시한, 단면 A, B, C에 있어서, 쇄파운동의 시간발전을 관찰해 본다.

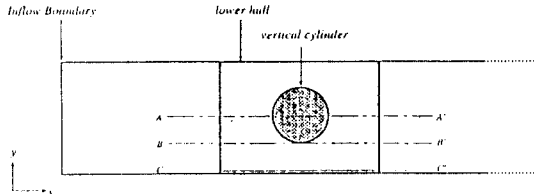


Fig. 7 Sectional divisions on horizontal plane.

Fig. 8은, 속도 벡터와 파형의 시간발전을 표시한다. 단면 A에 있어서, 쇄파의 거동은 보이지 않고, 시각 $4/16nT$ 의 원주 전후에 있어서의 파고의 차나, 그 시각 이후에 원주의 하류 쪽에 전진하는 파의 급경사 등이 보인다. 단면 B에서는, 심한 쇄파운동의 시간변동이 표시된다. 시각 $3/16nT$ 의 타원단면 중앙 위쪽의 자유표면에는 흐름이 집중되어, 자유표면의 급준화가 진전되고 있다. 또, 시각 $7/16nT$ 의 하류 쪽에는, 부수적인 쇄파운동(secondary wave breaking)이 표시되어 있는데, 파의 splitting 현상은 이 부수적인 쇄파운동과 밀접한 관계가 있다⁵⁾. 단면 C인 경우, 단면 B에 비해서는 전체적으로 부드러운 spilling breaker의 모습이 표시되고 있다.

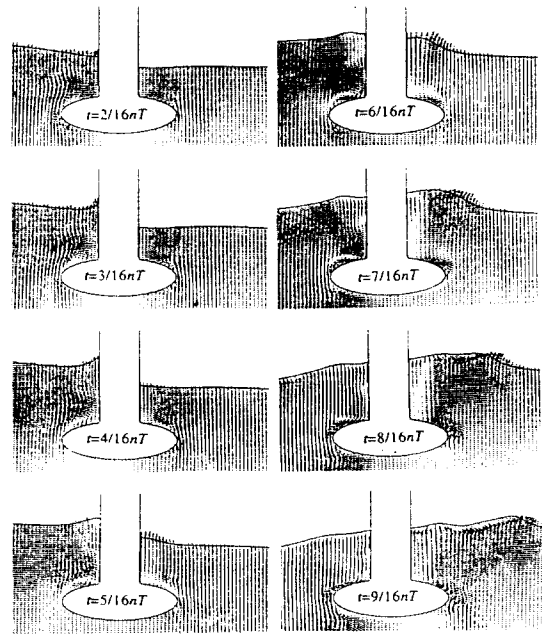


Fig. 8(a) Time-sequential developments of velocity vector fields of a part of floating offshore structure, on the vertical plane A-A' in Fig. 7.

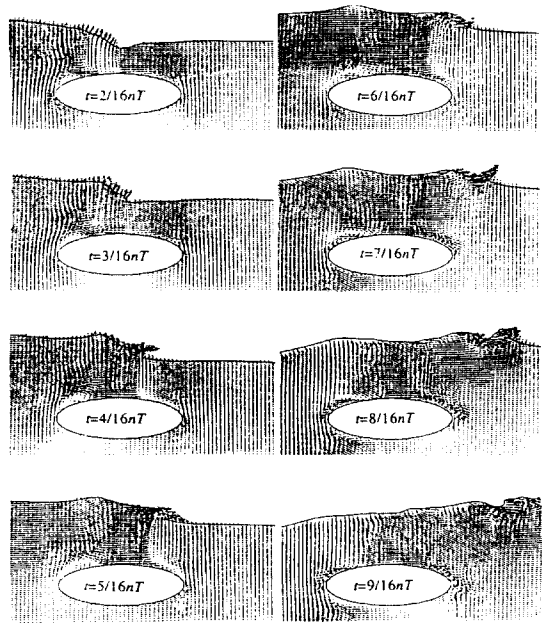


Fig. 8(b) Same as Fig. 8(a), on the vertical plane B-B' in Fig. 7.

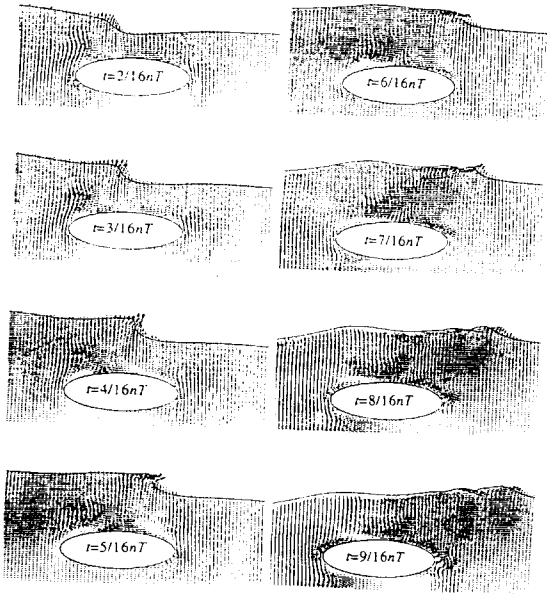


Fig. 8(c) Same as Fig. 8(a), on the vertical plane C-C' in Fig. 7.

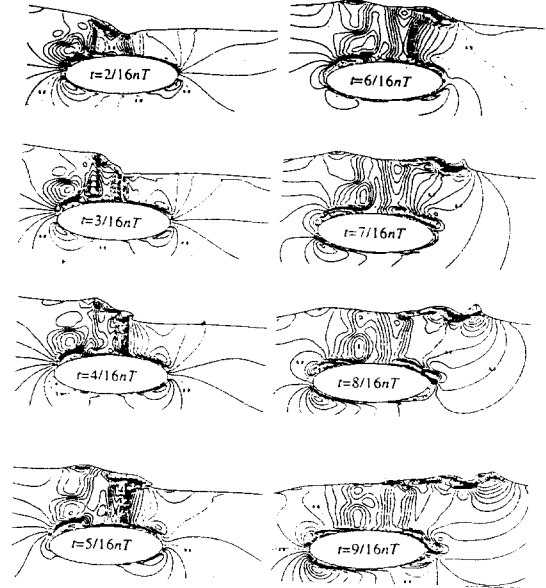


Fig. 9(b) Same as Fig.9(a), on the vertical plane B-B' in Fig. 7.

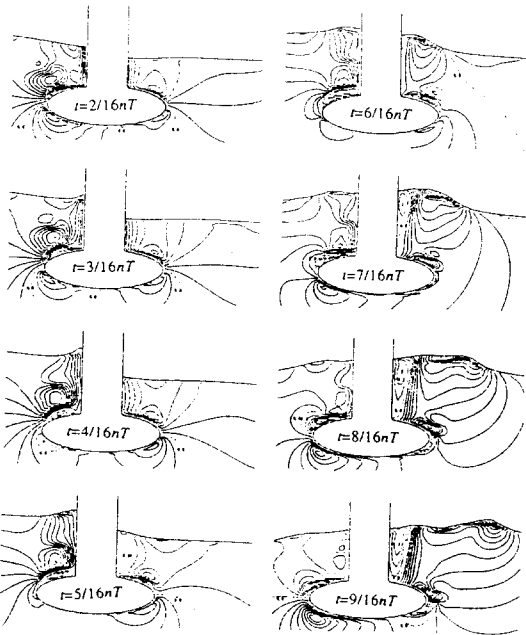


Fig. 9(a) Time-sequential developments of velocity u fields of a part of floating offshore structure, on the vertical plane A-A' in Fig. 7.

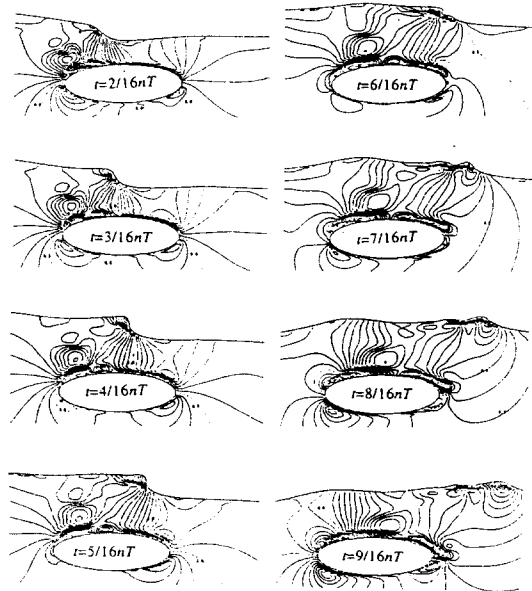


Fig. 9(c) Same as Fig. 9(a), on the vertical plane C-C' in Fig. 7.

Fig. 9는, 흐름방향의 성분을 갖는 속도 분포의 시간발전을 표시한다. 흐름방향의 속도성분은, 규칙진행파열의 쇄파운동 시, 파의 흐름방향의 박리를 일으키는 원인이 되는 중요한 성분이다¹⁰⁾. 단면 A에서, 원주 후단의 속도분포는, 아주 특이한 분포를 나타내고 있다. 시각 $7/16nT$ 의, 원주 후방에 나타난 불연속한 수위 상승 영역에, 음의 속도분포가 종방향으로 표시되어, 그 분포는 전진파가 전파됨에 따라 하류로 확산된다. 이것은, 흐름의 3차원성을 표시하는 것이고, 종래의 이론 계산에 의한 연구나 2차원 연구 등으로부터는 관찰되지 않는 것이다. 단면 B에서는, 원주의 측면 근방에서 흐름 방향에 수직인 속도분포와 쇄파하는 자유표면 부근의 흐름방향에 매우 복잡한 분포가 설명되어 있다. 단면 C에는, 2차원 물수체 주위의 쇄파운동의 수치계산⁵⁾에서와 같이, 비교적 완만한 분포를 나타낸다.

3.3.4 비선형성 유체력의 시간 변동

큰 파랑중에 놓인 lower hull 위의 원주 주위에는 3차원성이 강한 쇄파현상이 포함되어 있는 것이 표시되었다. 이와 같이, 복잡하며 한편 비선형성이 강한 유체역학적 특성을 포함하는 경우, 구조물의 유체력 추정은 공학적으로 무척이나 큰 의미를 갖게 되는데, 전후력(이하, 항력)과 상하력(이하, 양력)의 시간력을 TUMMAC-VIII 유한차분법에 의해 산정하고, Fig. 10에 실험 결과와 비교한

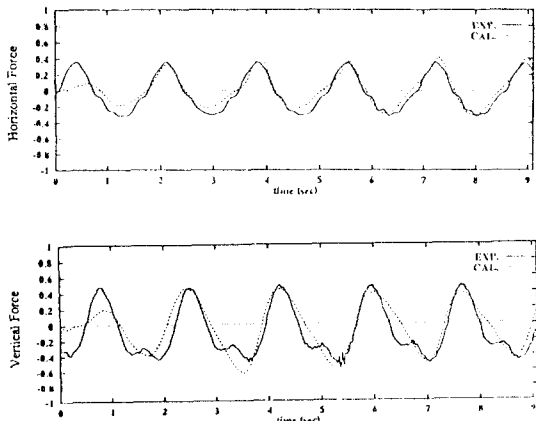


Fig. 10 Time histories of drag(left) and lift(right) coefficients on a part of floating offshore structure model.

다. 3차원 쇄파운동의 강한 비선형성 거동이 나타났음에도 불구하고, 실험과의 일치는 매우 양호하다. 특히, 본 방법에 의한 항력의 예측치는 실험과 잘 일치하고, 시간 변동의 과정과 파고의 변화 형상에 대한 일치는 두드러진다. 한편, 양력에 대해 변동폭의 절대치는 잘 일치하고 있지만, 음의 변동 영역에서는 실험치에서 나타나는 고주파 변동이 계산에서 명확히 나타나 있지 않다. 이 불일치에 대해서, 계산격자의 조밀성이 요구되며, 불일치가 표시되는 시각이 쇄파운동의 난류에 의한 유동장의 산일과정이 진행되고 있는 시각에 상당하므로, 이 산일 과정에 대한 모델링의 필요성이 느껴진다.

3.3.5 파형과 파랑 변동압의 국소적인 분포

Fig. 11과 Fig. 12에는, 각각 항력과 양력의 양의

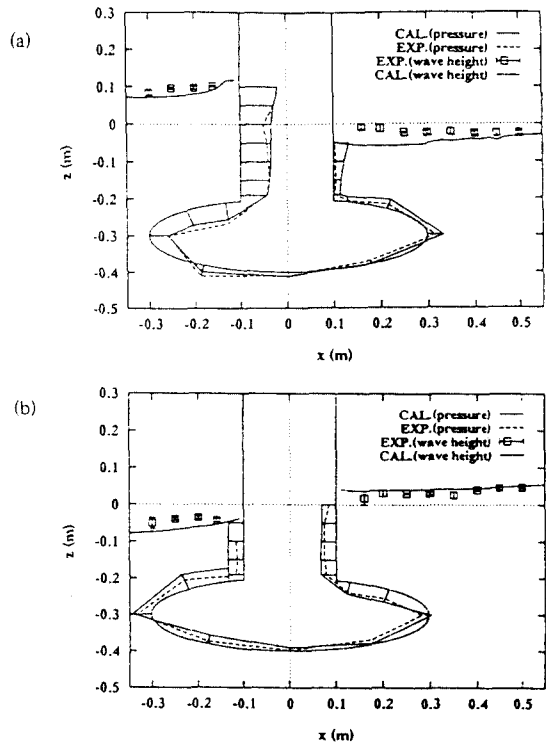


Fig. 11 Comparison of fluctuating pressure and wave elevation on the centerplane about a part of floating offshore structure model, (a) on the high drag condition $T=7.25\text{sec}$ and (b) on the low drag condition $T=8.0\text{sec}$.

최대 변동(이하, high drag/lift)과 음의 최대 변동(이하, low drag/lift)이 표시되는 시각에 있어서, 계산 영역의 중심선 상의 파형과 물체표면의 파랑 변동압 분포를 실험 계측치와 함께 표시한다.

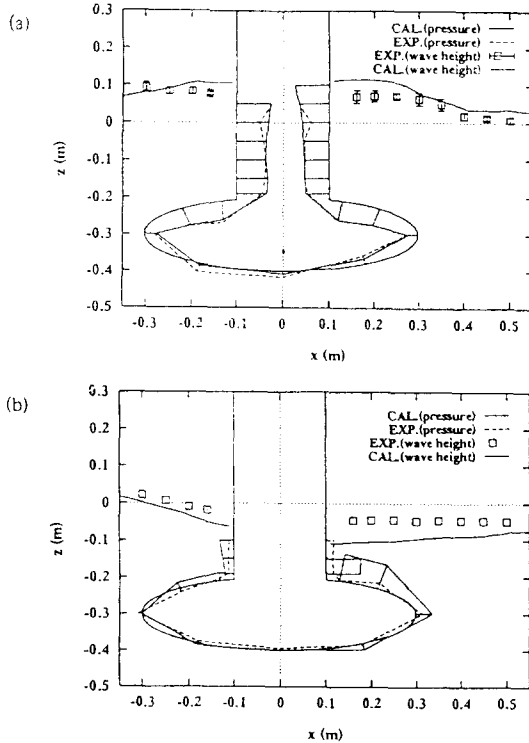


Fig. 12 Same as Fig. 11, (a) on the high lift condition $T=7.75$ sec and (b) on the low lift condition $T=8.75$ sec.

항력의 변동치가 최대인 경우, 원주의 전후에서 파고의 차가 크게 나타나며, high drag의 경우는, 구조물의 전면에서 파랑 변동압이 크게 나타난다. Low drag의 경우, high drag의 경우에 비해 압력의 절대치가 적게 나타나 있는데, 이는 Fig. 10에 알 수 있듯이, 음의 영역에서의 절대치가 양의 영역에서의 그것에 비해 적게 표시되기 때문이다.

항력의 변동치가 최대로 표시되는 시각에서는, 구조물의 전후에 걸친 파고의 차는 거의 없

고, 파면의 상승과 하강의 상태로 나타난다. High lift가 표시되는 경우, 파면은 구조물의 상방향에 상승되어 있고, 이에 의해 구조물에는 큰 압력분포가 나타난다. 이 시각에서의 파면은, Fig. 8(a)의 시각 $7/16nT$ 에서의 파면과 동일형상이며, 원주의 후단에 생긴 불연속한 파면의 상승이 나타난 시각이기도 하다. 이 시각에서 실험과의 일치는 잘 나타나 있다. 하지만, low lift가 표시되는 시각에 있어서, 구조물의 전반부는 실험과 일치하고 있지만, 후반부에서 파면이 실험치보다 낮고, 부압이 과잉으로 표시되는 것 같다.

3.3.6 파의 운동량과 회전량의 시간변동

파의 운동 에너지와 와류 에너지(enstrophy)의 강도를 표시하기 위하여, 운동량 상당의 물리량 ($|u|^2$)과 회전량 상당의 물리량 ($|\omega|^2$)에 대한 등치면의 시간변동을 Fig. 13에 표시한다. 쇄파가 일어나기 시작하는 시각 $3/16nT$ 부터, 쇄파하는 자유표면 근방에, 방대한 운동량의 집중과 함께 쇄파운동으로 인한 회전량이 나타난다. 시각 $7/16nT$ 에서는, 쇄파하는 자유표면의 과정 주위에 운동량의 강도가 비교적 폭넓게 펼쳐져 있는데, 원주 후단에서 불연속적인 파면의 상승이 나타난 시각에 해당한다. 시각 $9/16nT$ 부터는, 산일효과에 의해 과정 부근에서 운동량의 강도가 점차 약해지는 반면, 회전량이 발달해 가는데, 이것은 유동장에 이 시각 이후부터 난류에 의한 산일과정이 진행하고 있음을 말한다. 이 단계부터 서서히 계산과 실험의 불일치가 표시된다.

3.4 토론 및 검토

이상으로부터, TUMMAC-VIII 유한차분법에 의해, 큰 파랑중에 놓인 부유식 해양구조물 주위의 3차원 쇄파운동의 모습과 그에 동반된 비선형성 유체력의 평가를 행하고, 실험 계측 결과와 좋은 일치를 보임을 확인하였다.

본 연구에서 수치계산한, 큰 파랑중에 놓인 부유

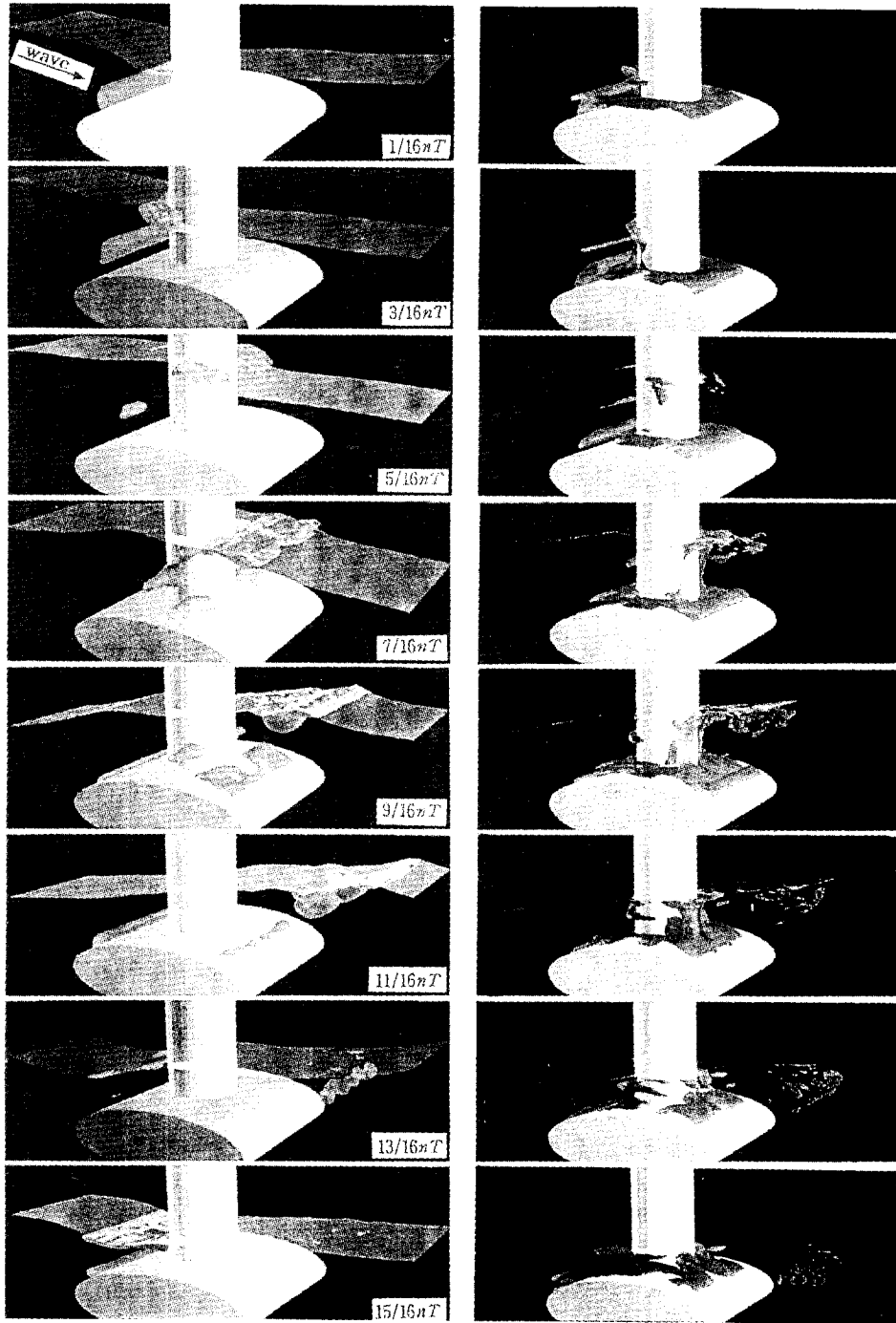


Fig. 13 Time-sequential developments of the iso- $|u|^2$ surface(left) and the iso- $|w|^2$ surface(right), the values of $|u|^2$ is 4 and $|w|^2$ is 10.

식 해양구조물 주위의 흐름은, 무척이나 복잡하며, 한편 3차원 비선형성이 강한 것이지만, 이와 같이 쇄파운동을 포함한 파의 비선형성 거동을 다룰 수 있다는 점으로 미루어, 해양구조물 설계에의 응용이 가능한 것으로 기대된다.

본 계산의 조건하에서, 이 구조물 주위(특히, 원주의 후방)에는, 파 운동의 1주기 동안에, 패턴이 다른 2종류의 쇄파운동이 일어남을 보였다. 하나는, 주로, 물체와 파와의 상호간섭에 의한 것이고, 또 다른 하나는, 파와 파의 상호간섭에 의한 것이다. 전자의 경우는, lower hull상의 원주의 측면 가까이에서 흐름방향에, 「물체와의 교란(攪亂)→파면의 급경사→박리→overturning→impinging→splashing & 보오텍스의 생성」의 과정을 거친다. 후자의 경우, 전자의 영향으로 원주의 양측면으로부터 측면 형상에 따라 부서져 오던 파가 원주의 후단의 중심선 부근에서 서로 충돌하여, 파면의 불연속적인 상승이 일어나고, 결국 turbulent bore와 같이 무너져 내린다. 이것은, 이제까지 연구대상이 되지 않았던 복잡한 3차원적인 쇄파운동의 하나이며, 본 방법은, 이와 같은 3차원성이 강한 쇄파운동을 무리없이 다루기에 충분하다는 것을 말해 준다. 하지만, 파가 부서지고 나서는, 난류에 의한 산일효과가 중요하게 되는데, 이 산일효과에 대한 모델링의 연구가 불가피하다고 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서, 얻은 결과를 정리해 보면, 다음과 같다.

1. 큰 파랑중에 놓인 부유식 해양구조물의 lower hull과 그 위에 고착되어 있는 원주 주위의, 3차원 쇄파운동을 동반한 비선형성이 강한 파동운동의 수치계산을 TUMMAC-VIII 유한차분법에 의해 행하고, 실험 계측 결과와 비교했다.
2. 큰 파랑중에 놓인 부유식 해양구조물 주위의 파동운동은, 물체-파와 파-파의 상호간섭에 의해, 무척이나 복잡하며, 한편 3차원 비선형성이 매우 강한 특성을 갖는다. 본 계산의 조건하에서, 이 구조물 주위(특히, 원주의 후방)에는, 파 운동의 1주기 동안에, 패턴이 다른 2종류의 쇄파

운동이 일어나는 것이 표시되었다. 제 1단계에서는, 주로, 물체-파의 상호간섭에 의한 것으로, lower hull 위의 원주의 측면 가까이에서 흐름방향에, 「물체와의 攪亂→파면의 급경사→박리→overturning→impinging→splashing & 보오텍스의 생성」의 과정을 거치고, 제 2단계에서는, 파-파의 상호간섭에 의한 것으로서, 원주의 후단에서 파와 파의 충돌에 의해, 파면의 불연속적인 상승이 일어나고, 결국 turbulent bore와 같이 무너져 내린다.

3. 본 방법에 의한, 파랑 변동압이나 유체역학적 특성의 예측치는, 실험과 비교해 매우 좋은 일치를 표시하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 계산의 정도는 아직 불충분하며, 특히, 쇄파 이후의 난류에 의한 산일과정에 대해서는 과제를 남기고 있다.

참 고 문 헌

- 1) Hooft, J.P., "Mathematical Method of Determining Hydrodynamically Induced Forces on a Semisubmersible", SNAME, Vol.79, 1971
- 2) Park, J.-C. et al., "On the Accuracy of Numerical Wave Making Techniques", J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol. 173, 1993
- 3) Park, J.-C. & Miyata, H., "Numerical Simulation of the Nonlinear Free-Surface Flow Caused by Breaking Waves", ASME, FED-Vol. 181, Free-Surface Turbulence, 1994
- 4) Miyata, H. & Park, J.-C., "Ch.5 Wave Breaking Simulation", Advances in Fluid Mechanics Potential Flow of Fluids, Edited by M. Rahman, Computational Mechanics Publications, Boston, 1995
- 5) Miyata, H. et al., "Numerical Study of Some Wave-Breaking Problems by a Finite-Difference Method", J. Kansai Soc. Naval Archit. Japan, Vol. 207, 1987
- 6) Nichols, B.D. & Hirt, C.W., "Improved Free Surface Boundary Conditions for Nu-

- merical Incompressible Flow Calculations", J. Comput. Phys., Vol. 8, 1971
- 7) Park, J.-C. et al., "Wave-Wake Interactions About a Body of Revolution Advancing Beneath the Free-Surface", Proc. 19th Symp. Naval Hydrodynamics, Seoul, XII, 1992
- 8) Miyata, H. & Yamada, Y., "A Finite-Difference Method for 3D Flows About Bodies of Complex Geometry in Rectangular Co-ordinate Systems", Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 14, 1992
- 9) Peregrin, D.H., "Breaking Waves on Beaches", Annual Review of Fluid Mechanics, Palo Alto, California, 1983
- 10) Melville, W.K. & Rapp, R.J., "Velocity Measurement at a Breaking Air-Water Interface", In Recent Advances in Engineering Mechanics and their Impact on Civil Engineering Practice, ASCE, 1983