

## 쇄파발생에 대한 실험적 연구

이동연, 주성문, 최항순

### 1. 서론

수조에서 조파기로 규칙파와 불규칙파를 발생하는 실험은 오래전부터 수행되었고, 최근에는 이를 수치계산으로 검증하려는 노력이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 2차원 수조에서 조파판의 작동을 적절히 조절하여 임의의 지점에 plunger 형 쇄파를 발생시키고, 수치계산으로 이를 확인한 내용을 담았다. 쇄파를 만드는 연구는 Chan(1988)이 조화함수를 합성시키는 기법으로 실험을 수행한 바가 있고, Dommermuth 등(1988)이 이를 수치적으로 검증하였다.

최근에는 수치수조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 주로 Longuet-Higgins & Cocklet (1976)이 제안한 Semi-Lagrangian 기법을 이용하고 있다. 이러한 방법을 이용하여 Vinje & Brevig (1981)는 한 주기의 파에 대한 연구를 수행한 반면, Coite (1987)는 속도 포텐셜을 이용하여 유한한 길이의 조파수조를 취급하였다.

기존의 방법들은 복소함수를 이용하거나 평면판넬법을 이용하였으나, 본 논문에서는 자유표면의 형상을 더욱 잘 표현할 수 있고 적은 수의 격자를 이용하여 높은 정도의 수치결과를 얻을 수 있는 고차경계요소법으로 계산을 수행하였다.

### 2. 문제의 정식화

위에서 기술한 조파문제를 수치적으로 계산하기 위해서 비점성, 비압축성 유체와 비회전성 유동을 가정하고 표면장력을 무시하여 속도 포텐셜을 도입하면, 다음과 같은 지배방정식과 경계조건을 얻게 된다. 좌표계는 조파기에서 소파기 방향을 양의 x축으로 취하고, 수직상방을 양의 y축으로 잡았다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, t) = 0 \quad \text{in } \Omega(x, y, t).$$

조파기벽면과 바닥 그리고 소파기 경계면의 경계조건은 벽면의 이동속도와 물입자의 법선속도가 같도록 한다.

$$\phi_n = \vec{V} \cdot \vec{n} \quad \text{on } \partial\Omega(x, y, t).$$

즉, 좌측 벽면에는 조파기의 작동속도를 부과하고,

$$\phi_n = -U(t),$$

바닥에는  $\phi_n = 0$  을 부과하였다.

그리고 소파기에서의 경계조건은 파가 제대로 빠져나가도록 방사조건을 부과해야 하나, 여기서는 충분히 먼 곳에 벽면이 있는 것으로 처리함으로써 이를 대체하였다. 물론 이 방법은 반사파가 들어오기 전까지의 결과만이 유효하고, 실제 유체영역보다 더 길게 계산영역을 택해야 하는 단점을 갖고 있다. 그러나 이렇게 함으로써 방사조건에 따르는 여러가지 어려운 문제를 해결할 수 있으며, 이후에 벽면에 의한 반사파를 수치모델화할 때 이 방법을 그대로 택할 수 있는 장점이 있다.

자유표면에 대한 운동학적 및 동역학적 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{D\vec{x}}{Dt} = \nabla\phi \quad \text{on } y = \eta,$$

$$\frac{(p-p_a)}{\rho} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 + g\eta = 0 \quad \text{on } y = \eta.$$

윗 식에서 속도 포텐셜의 시간에 대한 편미분을 전미분으로 바꾸면 다음식이 얻어지는데, 이것은 Lagrangian 관점에서 표현한 것이다.

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - g\eta \quad \text{on } y = \eta.$$

한편 초기에 교란이 없는 자유표면을 가정하면 시간에 대한 초기조건을 다음과 같이 부과할 수 있다.

$$\phi(x, \eta, 0) = 0.$$

앞에서 얻은 지배방정식과 경계조건을 만족하는 기본해는 잘 알려져 있다.

$$\phi^* = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{r}\right),$$

$$r = |\vec{x} - \vec{\xi}|.$$

기본해를 이용한 경계적분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}\phi(\vec{x}) + \int_S \phi(\vec{\xi})\phi_n^*(\vec{x}; \vec{\xi})dS(\vec{\xi}) = \int_S \phi_n(\vec{\xi})\phi^*(\vec{x}; \vec{\xi})dS(\vec{\xi})$$

$$S = S_f + S_l + S_b + S_r,$$

여기서 밀침자 f, l, b, r 은 각각 자유표면, 좌측벽, 바닥, 우측벽을 의미한다.

경계면에 고차패널을 배치하고 윗식에 대입하여 이산화시키면, 아래와 같은 선형방정식이 얻어진다. 그 다음 메시각마다 조파판의 이동속도에 따른 경계조건을 부과함으로써 자유수면의 속도포텐셜과 이동속도를 구한 다음, 다음 단계로 넘어가는 시간차분법을 적용한다.

$$\frac{1}{2} \phi^i + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \phi \phi_n^* d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \phi_n \phi^* d\Gamma$$

$$\hat{H}^{ij} = \int_{\Gamma_j} \phi_n^* d\Gamma; \quad G^{ij} = \int_{\Gamma_j} \phi^* d\Gamma;$$

$$\frac{1}{2} \phi^i + \sum_{j=1}^N \hat{H}^{ij} \phi^j = \sum_{j=1}^N G^{ij} \phi_n^j$$

$$H^{ij} = \begin{cases} \hat{H}^{ij} & \text{when } i \neq j \\ \hat{H}^{ij} + \frac{1}{2} & \text{when } i = j \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^N H^{ij} \phi^j = \sum_{j=1}^N G^{ij} \phi_n^j$$

경계적분법은 각 요소에서 물리량의 변화를 무시하고 상수로 취급하는 평면경계요소법(CPM)과 2차 이상의 함수로 물체표면을 정의하고 물리량의 변화 또한 2차 이상의 함수로 표현하는 고차경계요소법(HOBEM)으로 나눌 수 있다. 고차경계요소법의 특징은 Fig. 1에 나타낸 것과 바와 경계면의 위치와 물리량을 형상함수로 표현하여 곡면의 구현이 용이하고 자유표면을 이동시켜 새로운 위치로 갔을 때 격자점의 불일치를 피할 수 있다는 점이다. 또한 형상함수를 미분하여 접선속도를 구함으로써 속도포텐셜의 차이로 구하는 방법에 비해 접선속도를 정확하게 구할 수 있어 작은 요소수로 높은 정확도를 얻을 수 있다.

### 3. 실험개요

쇄파를 수조에서 구현하기 위하여 한국기계연구원 선박해양연구센터의 2D 조파수조에서 실험을 수행하였다. 실험개략도를 Fig. 2에 도시하였다. 2차원 수조의 제원은 길이 20m, 폭이 0.6m, 깊이는 0.8m이다. 본 실험에서의 수심은 0.52m로 하였다.

개인용 컴퓨터를 이용하여 실험자가 원하는 조파기 신호를 생성하여 AD변환을 통해 DC모터를 구동하여 피스톤형의 조파기를 작동하도록 하였다. 그리고 5개 지점에서 파고를 측정하고, 조파판의 위치를 측정한 신호를 DA변환하여 PC486으로 받아 결과를 분석하였다. 파고계의 위치는 조파판에서 7.00, 9.00, 9.25, 9.50, 9.75m 떨어진 지점에 설치하였다.

먼저 impulse형태로 조파판을 출발시키는 실험을 수행하였다. 조파판의 속도는 20cm/sec로 하여 0.5초 동안 10cm를 이동시키는 실험을 수행하였다. 조파판의 운동은 0.05초 이후에 작동을 시작하여 0.58초 동안 작동하는 특성을 확인하였고, 모든 실험에서 진폭의 감소를 확인하였다.

그 다음 조파판의 조화운동에 의해서 규칙파를 발생시키는 실험을 수행하였다. 규칙파의 신호는 다음과 같이 만들었다.

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t),$$

$$\text{where } \omega = \frac{2\pi}{T_p}$$

$T_p$ 는 조화운동의 주기이고,  $u_0$ 는 속도의 진폭이고, 조파판의 진동변위( $A_0$ )는  $u_0/\omega$  이 된다.

끝으로 쇄파를 얻기 위하여 일정범위의 주파수영역에 속한 조화함수를 합성하여 조파판의 신호를 만들었다. 정해진 위치에서 각 성분의 파정이 모아도록 선형 조파이론에 의해 위상차를 구하였다. 조파판의 위치는 다음식을 이용하여 얻었다.

$$x(t) = \sum a_i \sin(\omega_i t + \epsilon_i)$$

쇄파를 구현하기 위하여 다양한 주파수 영역에 걸쳐 실험을 수행한 결과, 쇄파를 일으키는 적절한 주파수영역이 존재함을 알게 되었다. 본 실험에서는 9.5 m 지점에 주어진 주파수의 파정이 모이도록 하였고, 주파수 영역은 0.4 Hz - 1.2 Hz 인 경우를 선택하였다. 낮은 주파수 영역인 0.3 - 0.9 Hz 의 경우는 쇄파를 일으키지 않고 불규칙한 파형만 보여 주었다. 중심주파수 0.8 Hz를 유지하면서 좁은 영역에 대한 경우에도(0.5 - 1.1Hz) 쇄파는 일어나지 않았는데, 이는 넓은 영역의 파가 모여야 만이 쇄파를 일으킨다는 것을 의미한다.

기준 주파수영역에서 각 조화함수의 진폭이 너무 작을 때는 쇄파가 일어나지 않았고, 점점 크게 하면 spilling 형태의 쇄파가 관측되었다. 즉, 적절한 진폭일 때 파가 깨지는 모양이 plunger형태를 나타내었다. 반복실험을 수행하여 파고계와 비디오촬영 결과로부터 이러한 현상이 재현됨을 확인하였다.

#### 4. 실험과 계산의 결과 비교

우선 impulse 의 경우를 살펴보면, 0.5초동안 10cm지점까지 조파판을 이동시키는 실험의 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 실선이 실험결과이고, 점선은 수치계산을 나타낸다. 대체로 좋은 일치율을 보이고 있다. 그러나 계산에 비해서 실험의 경우 파고가 약간 작게 나왔는데, 이것은 조파판이 요구한 것보다 느리게 작동하였기 때문이다. 또한 조파판의 뒷부분으로 빠져나가는 적은 양의 물을 계산에서는 고려하지 못하였기 때문으로 보인다. 한편 벽면에서의 점성의 영향도 있었을 것으로 추정된다.

다음으로 주기 2초이고 운동변위가 3.1cm인 경우에 7m지점에 위치한 파고계의 실험과 계산결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 대체로 실험과 계산결과는 일치함을 보여 주고 있다. 수선면에 배치한 격자의 수를 달리한 계산결과를 함께 나타내었는데, 이로부터 격자의 수가 200 개인 경우에 비해 400 개인 경우가 실험결과에 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 좀 더 정확한 수치해석을 위해서는 많은 격자를 자유표면에 배치하여야 한다.

끝으로 조화함수를 합성시킨 신호로 조파판을 작동시켰을 때의 결과를 Fig. 5 에 나타내었고, Fig. 6 은 쇄파현상이 일어날 때 찍은 사진이다. Plunger 형태로 쇄파가 일어남을 볼 수 있다. 9.0 m에서 수면이 제일 높아질 때 9.5 m에서는 수면이 제일 낮다. 쇄파가 일어날 때의 전형적인 파형을 보여주고 있다.

## 5. 결론

2차원 수조의 임의점에서 주어진 주파수 성분의 파가 집중되도록 조화합수를 합성하여 얻은 신호로 조파기를 작동시켜 쇄파를 발생시키는 실험과 고차경계요소법으로 수치계산한 결과를 비교하였다.

여러가지 주파수 성분의 선형파를 합성하여 임의의 지점에서 주어진 주파수 성분의 파정이 모이도록 위상차를 조절하고, 운동진폭을 변화시키면서 plunger 형의 쇄파를 관찰하였다. 쇄파에 영향을 미치는 인자로서 조파판의 운동변위와 합성하는 조화합수의 주파수 범위에 대한 실험도 수행하였다. 그 결과 주파수범위를 0.4Hz 에서 1.2Hz 까지의 실험에서는 위와 같은 현상을 확인할 수 있었지만, 낮은 주파수범위 (0.3 - 0.9 Hz)의 파를 합성한 실험에서는 쇄파를 관찰할 수 없었다. 이는 낮은 주파수에 의하여 생기는 장파의 파 기울기가 작기 때문으로 생각된다.

## 참고문헌

Chan, E.S. & Meville, W.K. (1988) " Deep-water plunging wave pressure on vertical plane", Proc. R. Soc. Lond. A.417, pp. 95-131

Dommermuth,D.G., Yue,D.K.P., Lin,W.M., Rapp,R.J., Chan, E.S. & Meville,W.K. (1988), " Deep water plunging breakers: comparison between potential theory and experiments." J.Fluid Mech. 189 , pp.423-442

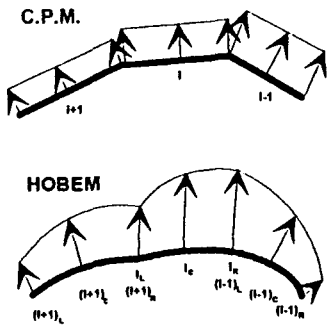


Fig. 1 CPM vs HOBEM

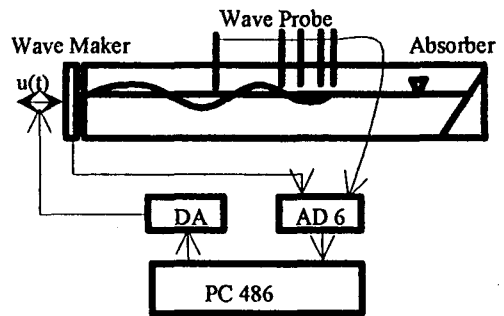


Fig. 2 Experimental Setup

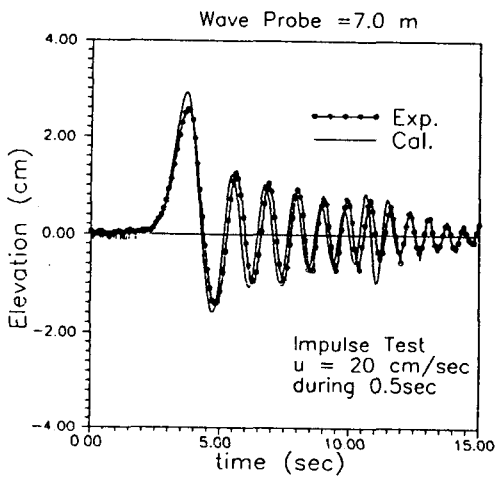


Fig. 3 Impulse Start Test

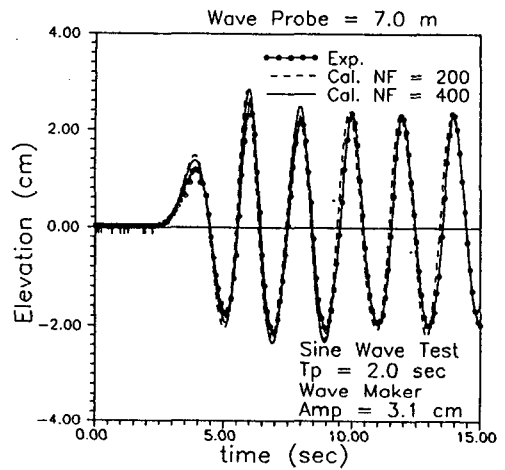


Fig. 4 Regular Wave Test

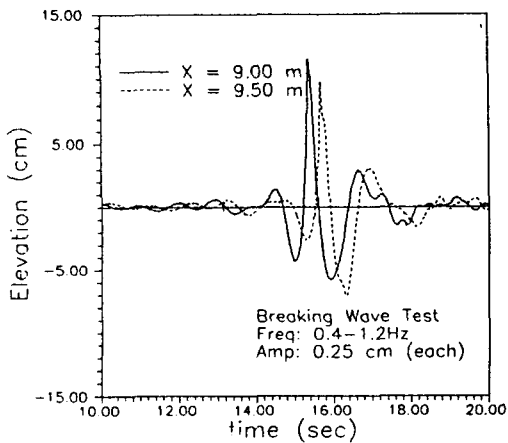


Fig. 5 Breaking Wave Test

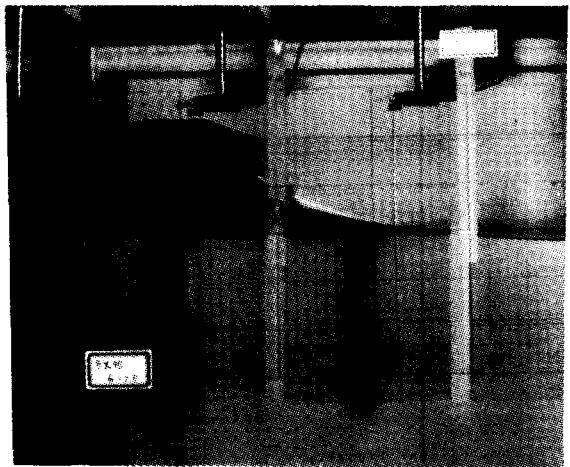


Fig. 6 Photo of Breaking Wave