

쇄파의 유동구조 및 쇄파력에 관한 연구

이병성^{*}· 조효제^{*}· 구자삼^{**}· 강병윤^{***}

^{*}한국해양대학교

^{**}부경대학교

^{***}한국중소조선기술연구소

Research on Wave Kinematics & Wave Loads in Breaking Wave

BYEONG-SEONG LEE^{*}, HYO-JAE JO^{*}, JA-SAM GOO^{**} AND BYUNG-YOON KANG^{***}

^{*} KOREA MARITIME UNIVERSITY

^{**}PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY

^{***}KOREA REARCH INSTITUTE of MEDIUM & SMALL SHIPBUILDING

KEY WORDS: breaking wave(쇄파), dispersion relation(분산성 관계), breaking point(쇄파점), breaking region(쇄파영역), particle kinematic(유체입자 운동), wave load(파력)

ABSTRACT: When the wind blows hard, most waves are breaking in sea. Breaking waves occur, exceeding limitation of wave steepness(wave height/wave length=1/7). Because a wave of single angular frequency couldn't generate the breaking phenomena at two dimensional ocean engineering basin, the breaking wave can be generated by the superposition of waves with various angular frequencies. We research how are the particle kinematics in the breaking wave and the magnitude of the breaking wave exciting force. We compare the force in a regular wave which has same specifications(wave height, period and length) as the breaking wave. Also the experimental results of wave exciting force and particle velocity are investigated by comparison on the analytic results using the potential theory.

1. 서 론

해역에 설치된 구조물은 자연에 의한 환경하중(파력, 풍력, 조류력)을 끊임없이 받고 있고 부유식 혹은 고정식 구조물의 경우 극한 환경조건에서도 견뎌낼 수 있는 강도를 가지도록 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 강풍을 동반한 해역에서 특별히 큰 파고를 가지는 파랑이 쇄파를 할 때 실린더 구조물에 작용하는 쇄파력에 대해서 조사한다. 쇄파에 대한 이론 및 실험적 연구는 오래전부터 많은 연구자들에 의해서 수행되어 왔지만, 아직까지 쇄파력의 특성파악이 완전하게 정립되어 있지는 않다.

따라서, 본 논문에서는 쇄파현상이 일어날 경우에 파고 및 유체입자의 속도 변화의 메커니즘을 조사하고, 이와 연계하여 구조물에 작용하는 쇄파력이 얼마만한 크기로 변화하는지 실험적인 방법으로 분석한다. 물론 실제해역에 설치된 구조물들이 쇄파현상에 의한 영향(빈도수)을 얼마만큼 받을 것인가에 대한 명확한 답은 아직 없지만, 쇄파현상에 관한 체계적인 연구를 통하여 해양구조물의 설계를 위한 기초 자료를 제공할 필요성은 충분히 있다. 일반적으로 해양구조물의 설계에는 일정한 재현주기를 가지는 설계파를 적용하고 있다. 그러나 같은 파고를 가지더라도 쇄파가 일어나게 되면 구조물에 작용하는 힘은 달라질 것이다. 설계파의 경우, 파력은 단일주파수를 가

지는 2차원 규칙파로서 간주하여 이론적, 실험적 접근이 가능하다. 그러나 쇄파의 경우는 비선형성이 강하기 때문에 이론적인 접근이 어렵다. 따라서 여기서는 실험에 의해서 쇄파를 재현하고, 유체입자의 속도와 파력을 측정하였다. 쇄파는 파도수와 생성방법을 적용한다. 즉, 여러 가지의 주파수를 가지는 파의 중첩에 의해 생성되는 파로서, 파형발달영역, 쇄파점(쇄파되기 직전) 그리고 쇄파영역으로 3가지 단계로 나누어 조사하였다. 세단계의 영역에서 수면 상승량과 파강제력이 어떤 관계를 가지는지 조사하고, 수면 상승량과 파강제력이 가장 크게 나타나는 지점에서 유체입자의 속도를 조사하였다.

따라서 본 연구는 구조물이 없을 때의 쇄파상태의 수면 상승량과 유체입자의 속도를 측정하고, 쇄파중의 구조물에 작용하는 파력을 체계적으로 파악하는데 중점을 둔다. 또한 쇄파하는 경우와 같은 제원(파고, 파장, 주기)을 가지는 규칙파의 유동특성 및 파력과 비교를 통해서 쇄파로 인한 유동의 변화와 파력의 변화에 대한 특성을 검토한다.

2. 실험조건 및 방법

2.1 실험 조건

(1) 2차원 조파수조

본 실험을 위해서 길이 25m, 폭 1m, 수심 0.8m의 조파

수조를 이용하였고, 조파장치로는 수조 끝단에 피스톤형 식 조파기를 사용하였다.

(2) 계측 장비

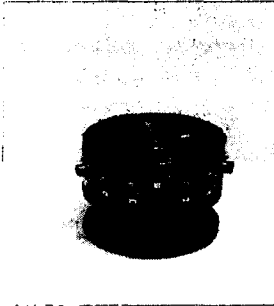


Fig. 2.1.1 Load cell

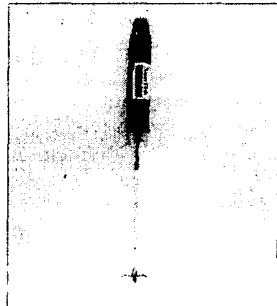


Fig. 2.1.2 Velocimeter

파력계측을 위해서는 Fig. 2.1.1에 나타나 있는 육 분력 계를 사용하였으며, 이는 3축방향 힘을 5kgf까지 측정할 수 있으며 오차는 ±0.5%이다. 유속 측정은 Fig.2.1.2에 나타난 A.D.V유속계로서 이는 도플러 효과를 이용한 것으로 유속 1mm/s에서 2.5m/s까지 측정할 수 있으며 오차는 ±1%이다. 이는 그림에서 보는 바와 같이 3개의 발사어의 간격이 필요하여 파정부의 최고점의 유속은 측정하기가 불가능하다. 그리고 파면의 상승량을 기록하기 위하여 ±0.25m까지 측정 가능한 저항식 파고계를 사용하였다. 서보식 파고계는 파면 형상의 변화가 원활한 경우에는 정확하게 측정할 수 있지만 쇄파와 같이 공동을 수반할 경우에는 많은 오차를 가져오므로 이번 실험에는 저항식 파고계를 사용하였다.

(3) 실험 모형

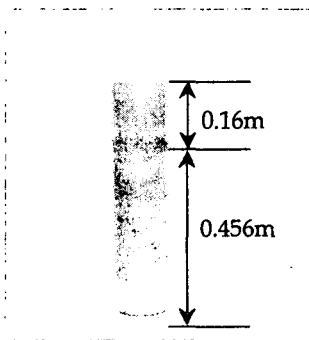


Fig. 2.1.3 Model for Experiment

모형은 Fig. 2.1.3과 같이 지름 0.1145m인 실린더형 구조물을 사용하였다.

(4) 파형 재현

① 파도수파 생성

2차원 조파수조 에서 단일주파수(규칙파)에 의해 생성

되어진 파형으로 쇄파현상을 구현하기 어렵기 때문에 분상성관계(dispersion relation)에 근거 하여 여러 종류의 주파수를 가진 파도들을 중첩해서 파도수파를 생성시킨다. 파도수파 생성식은 아래와 같다.

$$\zeta = \zeta(n) \times \sin w(n) \times (t - pt(n)) \quad (m) \quad (2.1.1)$$

n=1일때 $\zeta(1), w(1)$ 을 임의의 값으로 생성시키고 $pt(1) = 0$ (초기값의 시간위상)으로 둔다. 분산성관계는 아래와 같다.

$$w(1)^2 = g \times k(1) \times \tanh k(1) d \quad (rad/sec)^2 \quad (2.1.2)$$

식(2.1.2)는 초기 $w(1)$ 을 알면 수치해법인 Newton-Raphson method를 이용해서 $k(1)$ 의 값을 알 수 있고, 그때의 파속 $c(1)$ 은

$$c(1) = \sqrt{\frac{g}{k(1)} \tanh(k(1)d)} \quad (m/sec) \quad (2.1.3)$$

의 식으로부터 구할 수 있다. n=1 일때 10m 까지의 도달 $total\ time(1)$ 과 주기 $T(1)$ 은 아래식과 같다.

$$total\ time(1) = \frac{10}{c(1)} \quad (sec) \quad (2.1.4)$$

$$T(1) = \frac{2\pi}{w(1)} \quad (sec) \quad (2.1.5)$$

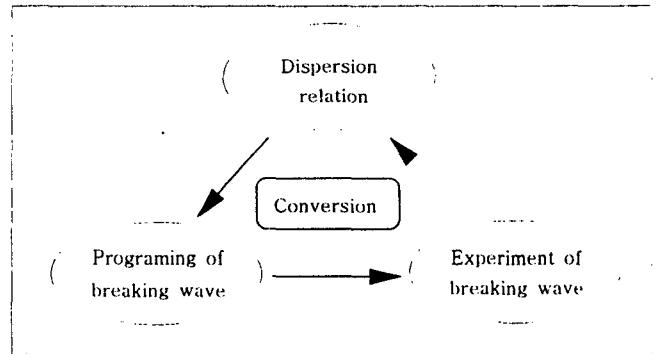


Fig 2.1.4 Generating Process of the Transient Wave

n=2일 경우 n=1일때의 주기 $T(1)$ 만큼의 시간위상차이가 생기므로 n=2일때의 파형이 10m까지 도달하는데 걸리는 시간은

$$total\ time(2) = total\ time(1) - T(1) \quad (2.1.6)$$

되어야 하고, 그때의 파속 $c(2)$ 는

$$c(2) = \frac{10}{total\ time(1) - T(1)} \quad (m/sec) \quad (2.1.7)$$

이 되어야 한다. 파형의 위상지연을 zero로 해주기 위해서

$$pt(n) = \sum_{n=1}^5 T(n-1) \quad (\text{단 } T(0) = 0) \quad (2.1.8)$$

$pt(n)$ 을 식(2.1.8)로서 산정해야하고, 이런 결과를 바탕으로 식(2.1.7)을 식(2.1.3)에 대입해서 $k(2)$ 의 값을 알 수 있고, 다시 $k(2)$ 를 식(2.1.2)에 대입하면 $w(2)$ 의 값을 구할 수 있으므로, $n=3,4,5$ 의 경우에도 같은 알고리즘이 적용된다. 단, 파진폭 $\zeta(n)$ 은 최대 파경사각($\alpha_0 = \text{constant}$)를 이용하여 $\zeta(n) = \alpha_0/k(n)$ 로부터 구한다.

㉓ 과도수파의 입력신호 및 생성쇄파

Fig 2.1.5는 앞에서 설명한 과정을 거쳐 만들어진 것으로 쇄파현상이 일어나는 과도수파(CASE 1)의 입력신호를 나타낸 것이다. 여기서 쇄파를 한 상태나 쇄파하기 직전 그리고 과도수파이기는 하지만 쇄파현상을 일으키지 않는 각각의 경우에 파력의 변화를 조사하기 위하여 입력신호의 전압을 낮추면서 5가지 과도수파를 생성시켰다. Fig 2.1.6은 수조에서 생성된 쇄파현상을 동반한 과도수파의 시계열이다. 그림에서 보는 바와 같이 쇄파하는 파정부는 좌우 비대칭 현상을 보여주고 있으며 파고는 21cm로 측정되었다.

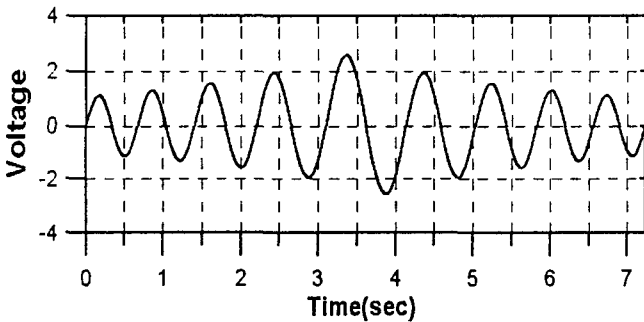


Fig. 2.1.5 Input Signal for Breaking Wave(CASE 1)

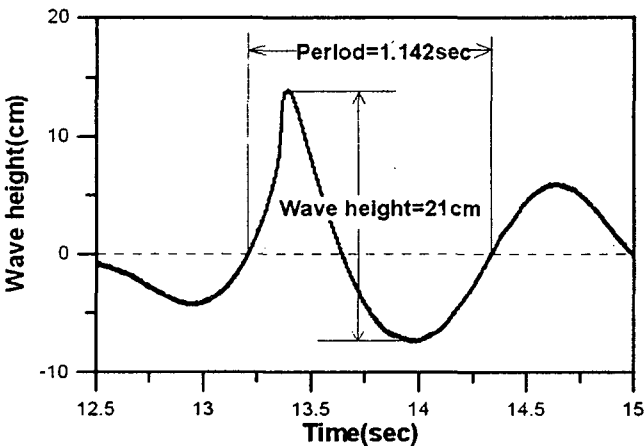


Fig. 2.1.6 Time History of Generated Breaking Wave

㉔ 규칙파 생성

규칙파는 쇄파가 일어나는 과도수파와의 물리적인 비교를 위하여 과도수파의 주기, 파고, 파장을 최대한 같게 하였다. Fig. 2.1.5에서 보여주는 바와 같이 과도수파는 비선형을 동반하고 다양한 주파수를 가지면서 중첩하고 있는 파이므로 간단하게 분산성관계를 적용할 수 없다. 따라서 파장은 화상자료를 이용하여 추정하였다(화상분석 파장추정값=약 2.05m). 규칙파의 주기는 과도수파의 시간 이력에서 Zero-up Cross를 취하여 추정한 결과 1.142sec가 되고, 이것을 분산성관계에 적용하면 파장은 약 2m로 주어지고, 파고는 약 0.21m로 생성시켰는데, 이는 조파수조의 특성을 나타내는 전달함수로부터 입력값(voltage)을 추정하였다. Fig. 2.1.7은 이상과 같이 하여 생성된 규칙파의 시계열을 나타낸다. 이는 과도수파와 파고 및 파장은 거의 같지만 파정부에 있어서 비대칭 현상이 보이지 않는다. 다만 wave steepness(파고/파장)가 0.105로서 파정에 비하여 파정이 높은 비선형파형을 보여주고 있다.

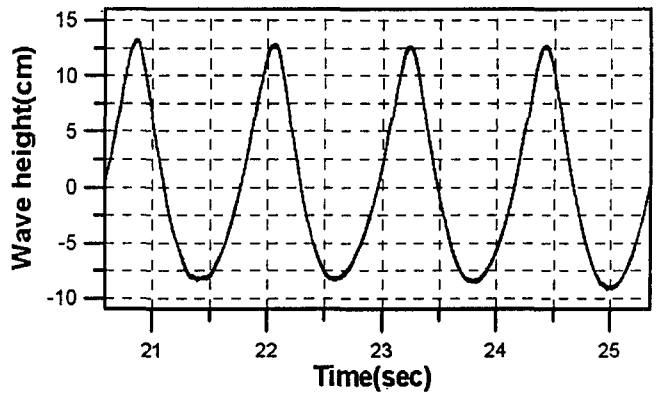


Fig. 2.1.7 Time History of Regular Wave

2.2 실험 방법

쇄파중 구조물에 작용하는 파력은 구조물의 중심점이 쇄파점을 기준으로 하여 어떤 위치에 있는지에 따라서 달라질 수 있다. 따라서 본 실험에서는 구조물의 중심점의 위치에 따른 파력의 변화하는 양상을 조사하기 위하여 쇄파점 전후에 걸쳐 측정범위를 1m로 한다. 분력계에 부착한 모형과 파고계를 5cm 간격으로 이동시키면서 22개의 측정 포인트에서 실험을 수행한다. 이는 Fig 2.2.1에 개략적으로 나타낸 바와 같이 ①, ②, ③ 등으로 22개 지점을 선택하여 파형발달 영역, 쇄파점 그리고 쇄파영역의 세 영역으로 구분하여 파형과 파력을 측정한다.

그리고 유속측정은 파력이 최대가 되는 지점을 선택하여, 그 지점에서 연직하 방향으로 유체입자의 속도분포를 측정한다. 규칙파중의 실험은 분력계와 파고계 그리고 유속계를 이용하여 측정하는 것은 동일하지만, 과도수파중 실험과 달리 임의의 한 포인트를 정해서 그 점에서 실험

을 수행한다. 왜냐하면 규칙파의 파고와 파력, 유체입자의 속도는 측정지점이 달라도 시계열로 나타나는 물리량은 변하지 않기 때문이다.

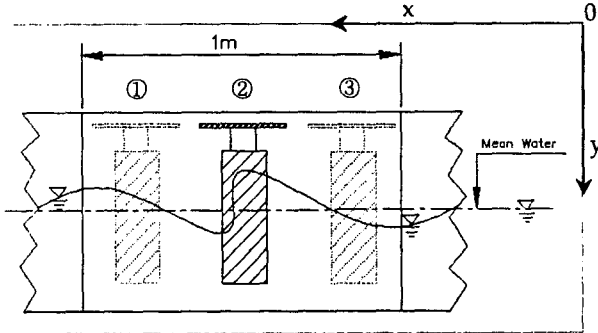


Fig. 2.2.1 Figuration of Experimental Concept

3. 이론 해석

임의 파형을 가지는 파랑중에서의 구조물에 작용하는 파력은 시간영역해석에 의해서 구할 수 있다. 시간영역해석법은 우선 주파수 영역에서 구해지는 파강제력의 주파수 응답함수(frequency transfer function)를 푸리에변환을 통하여 임펄스 응답함수(Impulse Response Function)를 구한다. 다음 임펄스 응답함수를 파형의 시간이력과 중첩적분(Convolution Integral)하면 파강제력 $F_{ex}(t)$ 의 시간이력이 구해진다. 이는 다음식과 같이 표현된다.

$$F_{ex}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_F(\tau)\} \zeta(t-\tau) d\tau \quad (3.1.1)$$

임펄스 응답함수는 다음과 같이 주파수 응답함수의 푸리에 변환으로 나타내어진다.

$$\{h_F(\tau)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{H_F(w)\} e^{-i w \tau} dw \quad (3.1.2)$$

식(3.1.2)를 식(3.1.1)에 대입하여 적분을 수행하면 임의 파형에 대한 파강제력의 시간이력을 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 쇄파중의 최대수면 상승량

본 실험에서 사용한 과도수파는 5종류의 주파수를 가지는 사인파들의 중첩에 의해서 생성한다. 다른 주파수를 가지는 파들의 합성이므로 분산성관계에 의해 파형이 진행되는 위치에 따라 파의 모든 물리량들이 변하는 특성이 있다. Fig. 4.1.1은 쇄파점을 기준으로 하여 전반부는 파형발달영역, 후반부는 쇄파영역으로 구분할 경우 각 영역에서 파면상승량의 최고값을 기록한 것이다. 특히 쇄파점은 동영상자료 분석을 통해서 파고 프로파일과 비교하여 정확하게 추정하였다. 쇄파현상이 일어나는 지점에서

는 극한 비선형현상을 동반하기 때문에 동일 지점에서 8회에 걸쳐 반복실험을 수행하고 그것을 평균해서 최대파면 상승량을 추정하였다.

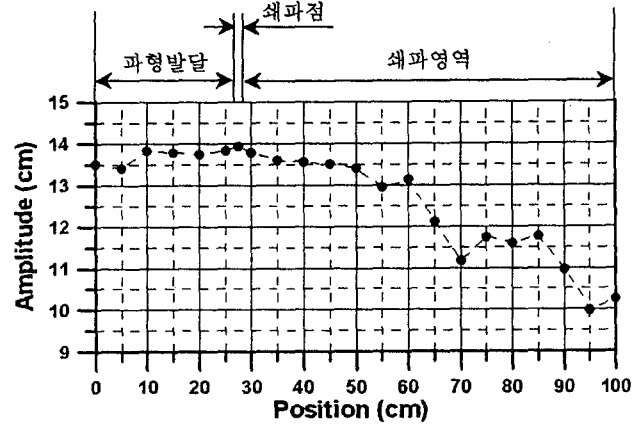


Fig. 4.1.1 Maximum Elevations in a Transient Wave according to Position

4.2 쇄파중의 파력

2.1절에서 기술한 바와 같이 본 실험에 사용된 과도수파는 5가지의 종류가 있다. 그중에서 CASE 1이 쇄파현상을 동반한 과도수파이다. Fig. 4.2.1은 쇄파가 일어나는 경우에 구조물의 중심점 이동에 따른 최대파력의 변화량을 나타낸 것이다. 이를 최대 파면 상승량을 나타낸 Fig. 4.1.1과 비교해볼 때 파면 상승량의 차이는 그다지 없지만, 쇄파점에서 최대파력이 나타나고 전후영역에서 점진적으로 줄어든다는 것을 알 수 있다. 쇄파점(27.5cm)에서의 평균파력은 3182g이다.

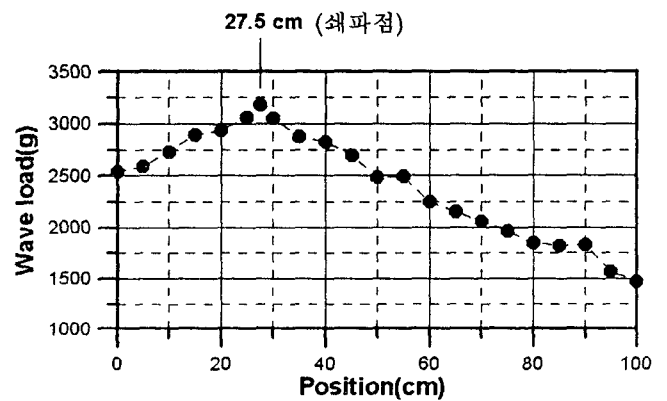


Fig. 4.2.1 Maximum Wave Forces in a Transient Wave according to Position

Fig 4.2.2는 쇄파점에서 측정된 파력의 시간이력을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 쇄파되는 순간의 파력이 급격하게 증가하여 순간충격하중으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 순간충격 이후에는 구조물의 떨림 현상을 동반하여 파력의 시간이력에 짧은 주기성분을 포함하고 있다. 그것은 구조물에 순간적인 충격(쇄파력)때문에 생기는 구

조물의 자유진동에 의한 힘으로 생각된다.

Fig. 4.2.3은 파력의 이론계산을 위한 임펄스응답함수를 나타내고 있다. Fig. 4.2.4는 쇄파실험에서 직접 측정된 파면 변화량의 시간이력과 임펄스응답함수를 이용하여 계산한 파력의 시간이력을 나타내고 있다. 이에 의하면 최대파력이 1561g로 실험값의 반정도 되는 적은 값으로 추정된다. 따라서 선형 계산에 의한 이론값은 쇄파를 동반하는 비선형 현상을 추정하기에는 너무 과소평가를 하게 된다.

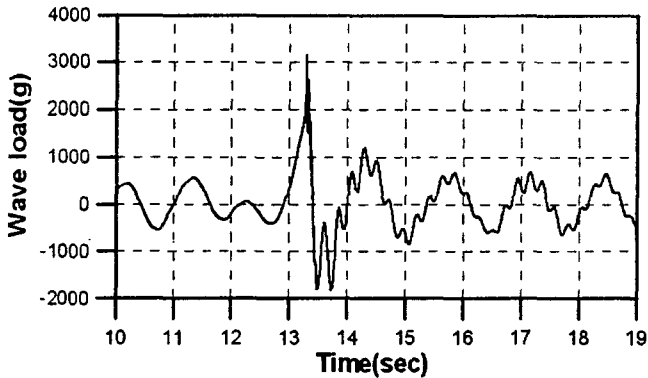


Fig. 4.2.2 Time History of Wave Force at Breaking Point(27.5cm)-Experiment

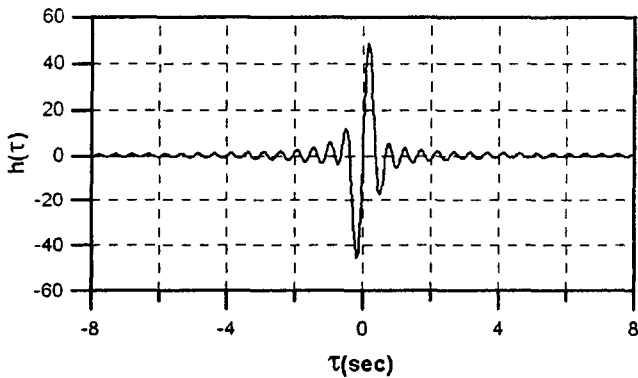


Fig. 4.2.3 Impulse Response Function of Wave Force

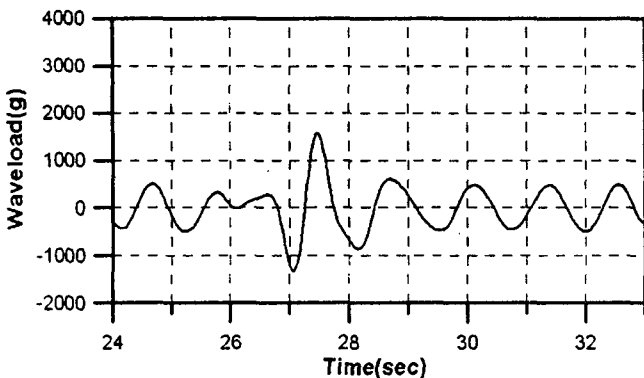


Fig. 4.2.4 Time History of Wave Force at Breaking Point(27.5cm)-Numerical

4.3 과도수파중의 파력비교

Fig. 4.3.1은 5가지의 과도수파를 재현했을 때의 최대 파면 상승량을 나타낸다. CASE 1은 쇄파현상을 동반한 경우이고 CASE 2의 최대파면 상승량은 CASE 1과 그다지 차이가 없지만 쇄파현상은 발생되지 않으며 CASE 3,4,5는 점진적으로 최대파면 상승량이 감소하는 경우이다. Fig. 4.3.2는 각 과도수파중의 최대파력을 나타낸 것이다. 이에 의하면 CASE 1과 CASE 2에서 최대파면 상승량이 변화량에 비하여 최대파력의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 CASE 2에서 CASE 3,4,5의 파력의 변화량은 최대파면 상승량의 차이에 비하여 파력의 감소량이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 쇄파에 의한 파력의 상승량이 두드러지는 것을 보여주고 있다.

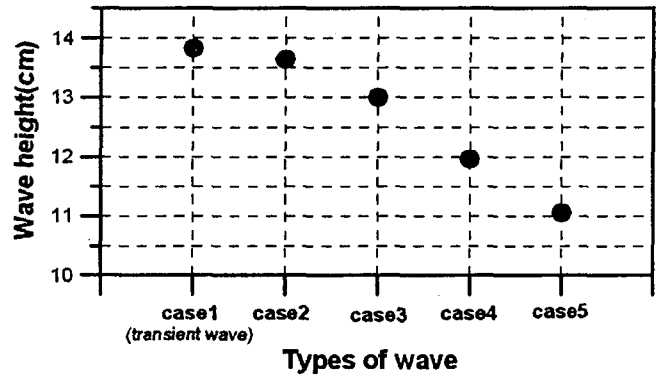


Fig. 4.3.1 Maximum Wave Elevations in Various Transient Waves

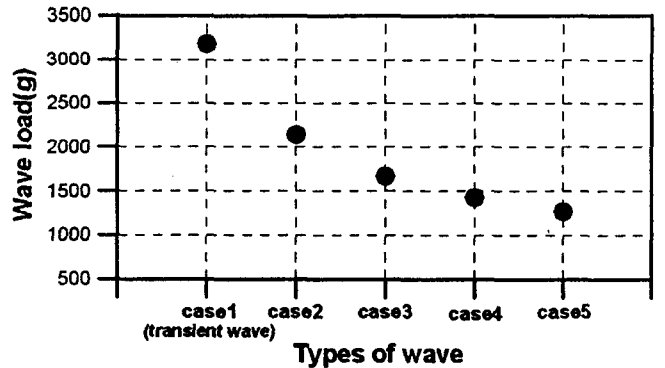


Fig. 4.3.2 Maximum Wave Forces in Various Transient Waves

4.4 규칙파중의 파력

여기서는 쇄파를 동반한 과도수파를 설계파 개념으로 파고, 파장, 파주기를 동일하게 산정한 규칙파를 재현하여 실험을 수행하고, 이를 쇄파중의 결과와 비교한다. Fig. 4.4.1에 규칙파중 파력의 시간이력을 나타내며 이에 의하면 최대파력의 평균치는 1920g이다. 이는 쇄파시의 최대파력과 비교해보면 쇄파가 일어날 경우의 파력이 설계파의 파력에 비해 약 1.66배 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 4.4.2는 규칙파의 파강제력을 이론적으로 추정한

값을 나타낸 것으로, 실험치와 비교하여 최대파력이 다소 적은 값인 1678g으로 측정되었다. 이는 역시 규칙파일지라도 비선형성이 강한 대파고를 가질 경우에는 오차를 수반하지만 개략적인 추정은 가능하다고 판단된다.

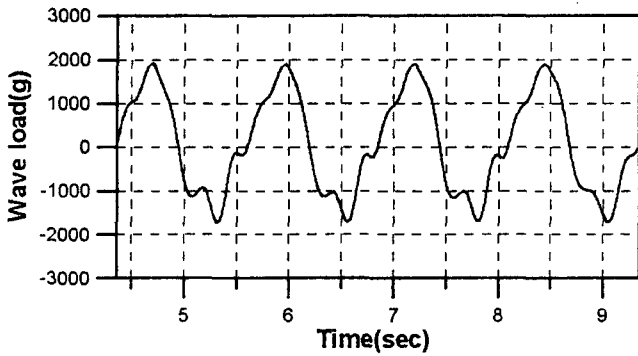


Fig. 4.4.1 Wave Force in Regular Wave(Experiment)

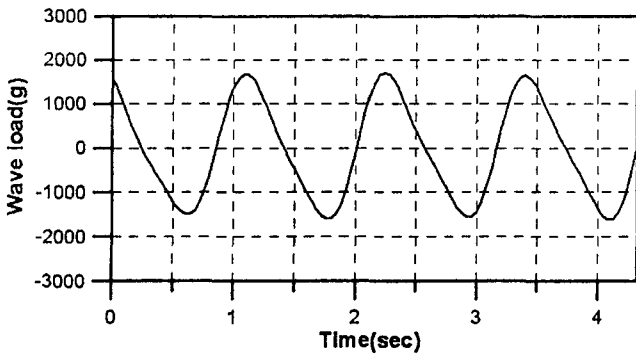


Fig. 4.4.2 Wave Force in Regular Wave(Numerical)

4.5 과도수파와 규칙파의 유체입자 속도

여기서는 쇄파중의 유체입자속도가 어떻게 분포하는지 규칙파 및 이론값과 비교하여 조사하였다. 규칙파는 쇄파를 동반한 과도수파와 같은 파고 및 주기를 가지며, 정지수면 위 5cm부터 하방 29cm까지 2cm간격으로 수평속도를 측정하였다. Fig 4.5.1에 나타난 바와 같이 수면하1cm 점을 전환점으로 유체입자의 속도가 상방향으로 갈수록 과도수파가 크게 되어 본 실험장치로는 측정할 수 없는 정지수면 위 5cm이상으로 가게 되면 쇄파중의 수평속도가 보다 크게 될 것으로 추정된다. 점선 및 실선으로 나타낸 것은 이론계산치로 각각 stokes 1차 및 2차파를 나타내고 있다. 이에 의하면 과도수파와 규칙파 모두 wave steepness(파고/파장) ≈ 0.105 로서 매우 크기 때문에 본 이론치와는 파정부에서 오차를 수반한다는 것을 알 수 있다.

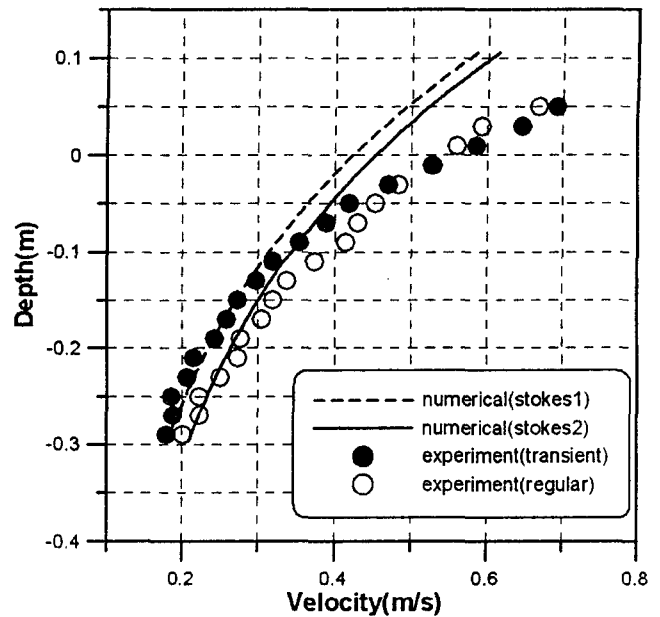


Fig. 4.5.1 Horizontal Velocity Profile of Particle

5. 결론

- (1) 쇄파하는 과정에서 파형발달 영역과 쇄파점에서 최대 파면 상승량은 거의 비슷하지만 쇄파점에서 파력이 확연하게 커지는 것을 알 수 있다.
- (2) 같은 파고와 파장을 가지는 규칙파와 과도수파중의 최대파력을 비교할 때 과도수파의 쇄파점에서의 파력이 규칙파의 최대파력보다 1.66배 크게 나타난다.
- (3) 최대파면 상승량을 달리하는 과도수파중의 파력은 최대 파면상승량이 비슷할지라도 쇄파될 경우, 파력이 확연하게 증가한다는 것을 알 수 있다.
- (4) 쇄파를 동반한 과도수파와 규칙파의 유체입자의 수평속도를 관측한 결과 파정부에서 과도수파의 수평속도가 크게 나타날 것으로 추정되어 이것이 파력 상승의 원인의 하나로 사료된다.

참고 문헌

- S. K. Chakrabarti.(1986). "Hydrodynamics of offshore structures" pp 41-74
- D. E. Newland. "Random vibrations, spectral and wavelet analysis" pp 53-66
- 이 창 호.(1988). "不規則波中の引張繫留拭 海洋構造物의 非線型 應答 解析" pp 151-161
- 손 경 호.(1988). "해양파 역학" pp 1-110
- 오 태 원.(2003). "Spar의 동적 거동에 대한 실험적 연구" pp 27-49