

# 잠제상에 설치된 표식암(의암)에 작용하는 규칙파파력의 실험적 연구

배기성\* · 허동수\*\*

\*경상대학교 토목환경공학부(해양산업연구소),

\*\*나고야대학대학원 공학연구과

## Wave Force Acting on the Artificial Rock installed on a Submerged Breakwater in a Regular Wave Field

KI-SEONG BAE\* AND DONG-SOO HUR\*\*

\*Division of Civil & Environmental Eng., Gyeongsang Univ., Tongyeong, Korea

\*\*Department of Civil Eng., Nagoya Univ., Nagoya, Japan

**KEY WORDS:** Artificial Rock 의암, Impulsive Breaking Wave Force 충격쇄파력, Submerged Breakwater 잠제, Wave Breaking 쇄파, Drag Coefficient 항력계수, Inertia Coefficient 관성력계수

**ABSTRACT:** Recently, artificial rocks, instead of buoys, have been placed on the submerged breakwater to indicate its location. The accurate estimation of wave forces on these rocks is deemed necessary for their stability design. Characteristics of the wave force, however, are expected to be very complicated because of the occurrence of breaking or post-breaking waves. In this regard, wave forces exerted on an artificial rock have been investigated in this paper. The maximum wave force has been found to strongly dependent on the location and shape of the artificial rock that is placed on the submerged breakwater. The plunging breaker occurs near the leading crown edge of a submerged breakwater, which causes impulsive breaking wave force on the rock. Using the Morison equation, with the velocity and acceleration at the front face of the artificial rock and varying water surface level, it is possible to estimate wave forces, even impulsive breaking wave forces, that are acting on the rock installed on a submerged breakwater. The vertical wave force is also found to depend, significantly, on the buoyant force.

### 1. 서 론

최근, 해안구조물의 설계에 있어서, 경관이나 친수성이 강조됨에 따라 잠제형식의 이용이 증가되고 있다. 잠제는 경관면은 물론 해수교환면에서 높은 기능을 가지고 있으나, 천단이 평수면 아래에 위치하기 때문에 소형선박의 항해에서 충돌 및 좌초 등의 장애를 초래할 수 있으므로 그 대책이 요구된다. 방면으로서 잠제의 설치위치를 부이로 명시하는 경우도 있지만, 경관상 뿐 만아니라 쇄파파력에 의한 계류시스템의 파단과 같은 문제점이 지적되고 있다.

본 연구에서는 계류부이방식의 대신에 자연에 가까운 경관을 창조할 수 있는 표식암(의암, Photo 1 참조)의 적용을 검토한다. 표식암은 천연석을 사용할 수도 있지만, 최근 의암의 제작기술이 비약적으로 발달하고 있어 인공환경창조로서의 공간장조기술의 향상과 더불어 조형을 포함한 인공표식암의 증가가 예상된다. 그러나 표식암은 형상이 복잡하고, 잠제상에 설치되는 경우, 천단수심에 비해 수위변동이 크기 때문에 수위의

동적변화를 고려한 파력산정이 요구된다. 더욱이 잠제상에서는 일반적으로 쇄파 혹은 쇄파후의 파랑이 작용하기 때문에 작용파력특성은 매우 복잡할 것으로 예측된다.

여기서, 표식암과 같은 고립된 구조물에 작용하는 파력에 관한 기존의 연구에서는 대부분 원주를 대상으로 하고 있다. 일반적으로 구조물의 대표경이 입사파장보다 작고, 구조물에 의한 파랑의 변형을 무시할 수 있는 경우에 대한 파력 산정식으로서 Morison식(Morison et al., 1950)을 이용한 항력계수와 관성력계수에 관한 수많은 연구결과가 보고되어 있다. 하지만, 파랑이 구조물 전면에서 쇄파된 후, 구조물에 충격쇄파력이 작용될 경우는, 수파의 충돌에 의한 부가질량이 급격히 변화하므로 충격쇄파력을 표현하기 위해서는 항력과 관성력이외에 별도로 충격쇄파력의 효과를 고려할 필요가 있는 것으로 지적되고 있다(예를 들면, Goda et al., 1966).

원주에 작용하는 충격쇄파력의 연구로서 Ross(1955, 1959) 및 Hall(1958)에 의해 수리모형실험이 수행되었고, 실험결과에 근거한 산정식이 Shore Protection Manual(CERC, 1975)에 제시되어 있다. Goda et al.(1966)과 Horikawa et al.(1973)는, Karman(1929)의 부가질량이론을 주상체에 작용하는 충격쇄파

제1저자 배기성 연락처: 경상남도 통영시 인평동 445  
055)640-3157 kiseong@gshp.gsnu.ac.kr

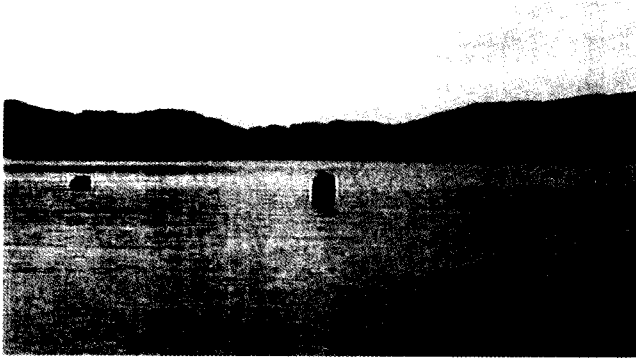


Photo 1 Artificial rocks on a submerged breakwater (Oohama beach in Fukui Pref., Japan)

력의 문제에 적용하여, 쇄파의 파면고를 쇄파권입물로 나타내는 계산모델을 제한함과 동시에 실험으로부터 얻어진 쇄파권 입물의 산정도를 제시하고 있다. 이 방법은 충격쇄파력에 대한 쇄파형식의 영향을 고려할 수 있을 뿐만 아니라, 충격력의 시간 변화도 산정할 수 있으므로 구조물의 동적거동을 예측할 수 있는 실용적인 방법이라고 할 수 있다. Sawaragi et al.(1983)은 파면의 경사를 고려한 충격쇄파력의 산정법을 검토하였다. 또한, 등대의 내파설계를 목적으로 한 Goda et al.(1972)의 연구에서는 암초상의 원주에 작용하는 충격쇄파력의 산정식으로 Hiroi식과 유사한 실험식을 제안하였다.

이상과 같이 원주 및 연직주상체를 대상으로 한 많은 실험적 연구가 행해져 있지만, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 표식암과 같이 단면이 변화하는 구조물에 작용하는 충격쇄파력에 관한 연구는 거의 수행되어 있지 않다고 해도 과언이 아니다.

따라서 본 연구에서는 투과성 잠제상의 표식암에 작용하는 규칙파의 파력특성에 대하여 수리모형실험을 통하여 검토한다. 먼저 파고, 평균수위 등의 파동장과 유속장의 특성을 고찰하고, 파력 산정식으로서 Morison식의 적용성을 검토함과 동시에 관성력계수와 항력계수의 특성에 대하여 표식암의 형상과 관련해 논의한다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 차원해석

투과성 잠제상의 구조물에 작용하는 파력은 식(1)과 같은 물리량에 지배된다고 생각할 수 있다.

$$F = f(D, h_t, x, T_i, H_i, \rho, g, R, B, s, \tan \alpha, \mu, t, x, \iota) \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 구조물의 대표길이,  $h_t$ 는 잠제의 해측 경사시작점의 수심,  $x$ 는 잠제 천단의 해측단으로부터의 수평거리,  $T_i$ 는 파랑의 주기,  $H_i$ 는 입사파고,  $\rho$ 는 유체밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $R$ 는 잠제의 천단수심,  $B$ 는 잠제의 천단폭,  $s$ 는 잠제의 비탈면 경사,  $\tan \alpha$ 는 해저경사,  $\mu$ 는 유체의 분자점성계수,  $t$ 는 시간,  $\kappa$ 는 구조물의 형상을 나타내는 무차원 파라미터,  $\iota$ 는 잠제의 공극율을 나타낸다.

식(1)에 Buckingham의  $\pi$ 정리를 적용해서 정리하면, 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{F}{\rho g H_i D^2} = \phi \left( \frac{x}{g T_i^2}, \frac{h_t}{g T_i^2}, \frac{H_i}{D}, \frac{D}{h_t}, \frac{B}{h_t}, \frac{R}{h_t}, s, \tan \alpha, x, \iota, \frac{h_t \sqrt{g D}}{\nu}, \frac{t}{T_i} \right) \quad (2)$$

여기서,  $\nu (= \rho/\mu)$ 는 유체의 동점성계수를 나타낸다. 우변 제3항의  $H_i/D$ 는 Keulegan-Carpenter 수 (Keulegan and Carpenter, 1958, 이하 K.C.수라고 칭한다)에 대응하는 항으로, 입사파고  $H_i$ 를 대신해 유속의 대표진폭  $U_m$ 을 이용하면,  $U_m T_i/D$ 로 나타낼 수 있다. 무차원 파력  $F/\rho g H_i D^2$ 에 관해서 최대치  $F_m/\rho g H_i D^2$ (아랫첨자  $m$ 은 파랑이 정상상태에 도달한 후, 5개 파랑의 최대치의 평균을 나타낸다)에 관한 경우에는 시간 항  $t/T_i$ 를 무시한다. 또한  $g T_i^2$ 를 대신해서  $L_i$ (입사파장)을 이용할 수 있다.

본 연구에서는 식(1)에 나타난 것과 같은 물리량 전부의 효과를 실험으로부터 검토하는 것은 곤란하기 때문에  $D, R, B, s, \tan \alpha, \iota$ 를 고정하여 실험을 수행하는 것으로 한다. 따라서 무차원 최대파력  $F_m/\rho g H_i D^2$ 는 다음과 같은 5개의 무차원량에 지배된다고 볼 수 있다.

$$\frac{F_m}{\rho g H_i D^2} = \psi \left( \frac{x}{L_i}, \frac{h_t}{L_i}, \frac{H_i}{D}, \frac{R}{h_t}, x \right) \quad (3)$$

### 2.2 실험조건 및 실험방법

Fig. 1과 같은 2차원수조(길이 30m, 폭 0.7m, 높이 0.9m)를 이용하였다. 수조의 측단에는 flap형 조파장치가 설치되어 있으며, 수조내에는 일정경사  $\tan \alpha = 1/30$ 의 불투과 사면을 설치하고, 자갈로 잠제모형을 설치하였다. 그리고, 정선부근에는 반사파를 없애기 위하여 소파용 필터를 설치했다. 잠제의 높이를 2종류( $h_t = 10, 20$ cm)로 변화시키고, 천단수심( $R = 4$ cm) 및 비탈면 경사( $s = 1/3$ )를 고정하였다.

수리실험에 사용되는 표식암 모형(이하, 구조물로 칭한다)은 실제로 시공예가 있는 표식암의 형상을 이상화한 Fig. 2의 원추대, 각추대 및 직방체 3종류를 이용하였다. 먼저, 수조상단에 고정된 지지대에 3분력계를 달고, 그 아래에 구조물 모형을 매달아서 파력을 계측하였다(Photo 2 참조). 이 때, 잠제의 천단과 구조물 저면과의 거리는 2mm 정도가 되도록 하였고, 직방체와 각추대의 경우는 저면의 한 변이 파봉과 평행이 되도록 설치하였다. 구조물 모형의 설치위치를 잠제천단의 해측단으로부터 7개소( $x = 7, 17.2, 27, 37, 52, 72, 92$ cm)로 옮겨가면서 계측하였다.

입사파는 규칙파로서, 주기는 3종류( $T_i = 1.0, 1.4, 2.0$ s)로 변화시켰다. 각각의 주기에 대해서 입사파고  $H_i$ 를 미세하게 변화시켜가면서 구조물에 작용하는 파랑의 쇄파조건, 즉 Spilling형, Spilling-Plunging 중간형, Plunging형을 발생시켰다. 이 때, 쇄파발생의 유무와 쇄파발생 위치를 다음과 같은 4종류의 조건이 되도록 하였다.

- (A) 비쇄파(구조물을 통과하여 쇄파하는 경우도 포함)
- (B) 구조물의 중앙에서 쇄파

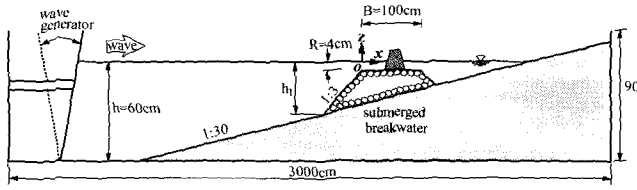


Fig. 1 Wave tank

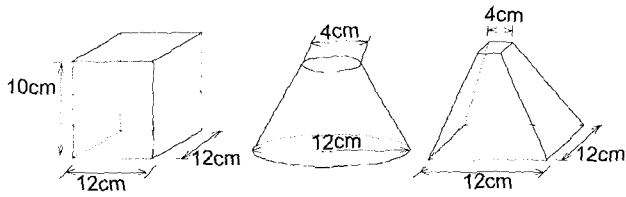


Fig. 2 Model structure used in experiments

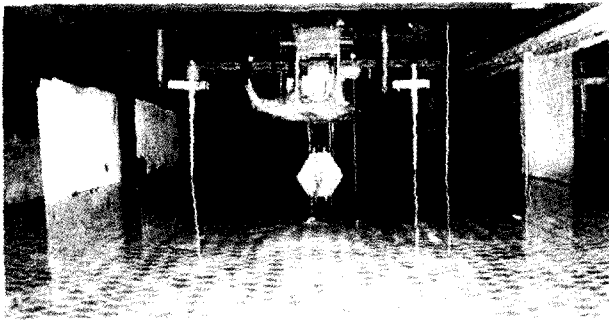


Photo 2 Set-up of model structure

- 구조물의 바로 전면에서 쇄파되어 구조물에 충격쇄파력이 작용하는 경우
- 구조물의 해측에서 쇄파되어 쇄파후의 파가 구조물에 작용하는 경우

또한 입사파고 및 입사파의 파장으로서 조파장치 전면의 일영수심역( $h=60\text{cm}$ )에서의 값을 적용하였다. 각각의 조건에 대하여 구조물에 작용하는 수평·연직방향 파력( $F_x, F_z$ ), 구조물 중심위치에서의 수위변동 및 조파장치 전면에서의 수위변동, 구조물중심위치와 구조물 전면위치(원추대 및 각추대의 경우는 일영수상태에서 수면아래에 잠긴 구조물 경사면의 중심위치를

구조물 전면위치로 정의한다)의 천단상 1cm에서의 수평·연직 방향 유속( $u, w$ ), 구조물 저면의 중심위치에서 압력을 동시에 계측하였다. 수위변동은 전기용량식파고계(C-300, C-500), 유속은 전자유속계(ACM-200P), 파력은 3분력계(LSM-5KBS), 압력은 초소형압력계(PS05-KC)로 계측하였다. 수위계와 유속계의 출력은 각각 수위계 직류증폭기(CH-306)와 유속계 증폭기(ACM-200P), 3분력계 그리고 압력계의 출력은 전용증폭기(DPM-712B)를 통해서 전기신호로 변환한 후 펜레코더(WR3701-6L)에 기록함과 동시에 2대의 컴퓨터를 이용하여 샘플링타임 0.04초(25Hz), Data 수 2600개와 샘플링타임 0.0005초(2kHz), Data 수 30000개로 AD변환하여 저장하였다.

실험에서 얻어진 수위의 시간변화 해석에는 zero-down crossing 법을 이용하여 개개의 파랑을 정의하는 파별해석을 하였으며, 파고가 정상상태로 된 후, 5개 파랑의 평균된 파력과 유속의 최대치를 최대파력, 최대유속으로 정의하였다.

### 2.3 해석방법 및 파력산정식

입사파장에 비해서 대표길이가 작은 구조물에 작용하는 파력은 일반적으로 Morison식으로 산정되는 경우가 많다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 구조물도 입사파장에 비하면 대표길이가 매우 작은 구조물이므로 그 작용파력의 산정에는 Morison식을 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 즉 작용파력  $F$ 는 식(4)로 주어질 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A U |U| + C_M \rho V \dot{U} \quad (4)$$

여기서  $C_D$ 는 항력계수,  $C_M$ 은 관성력계수,  $A$ 는 구조물의 흐름방향의 투영면적,  $V$ 는 구조물의 배수체적,  $U$ 는 물입자속도,  $\dot{U}$ 는 가속도를 나타낸다. Morison식중의 항력계수와 관성력계수의 산정에 있어서는 최소자승법을 이용하였다. 또한, 가속도의 시간파형은 실험에서 얻어진 유속의 시간파형을 Fourier 변환에 의한 주파수성분파로 분해한 후에 수치미분에 상당하는 수치필터를 이용하여 계산하였다.

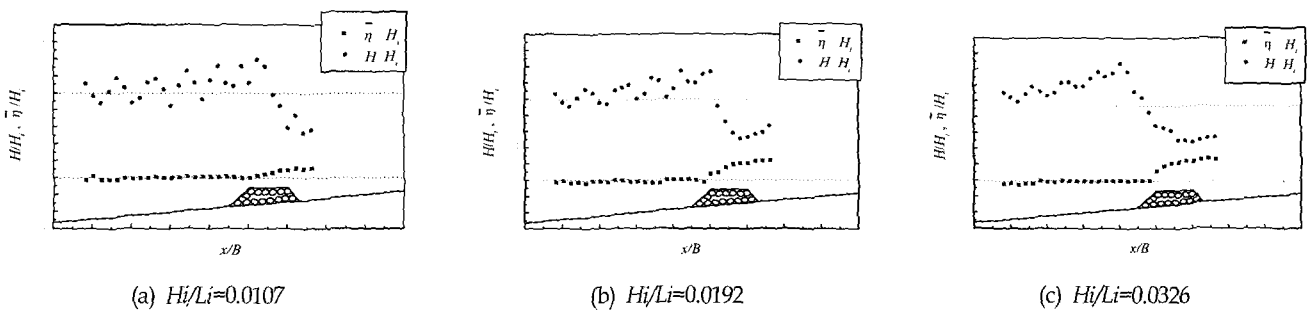


Fig. 3 Wave height distribution and mean water level ( $R/h_t=0.4$ )

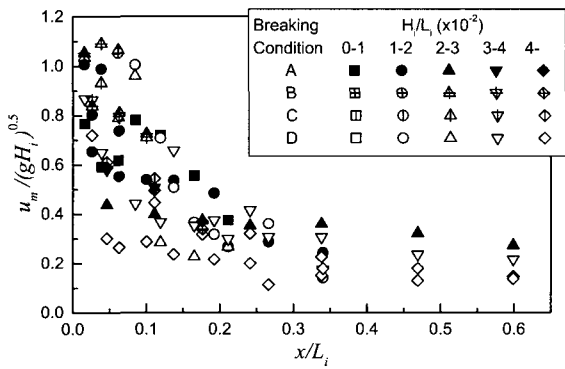
### 3. 파동장의 특성

#### 3.1 파고분포와 평균수위

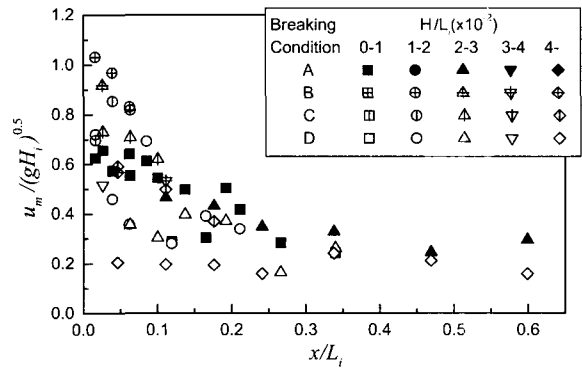
Fig. 3은,  $R/h_i=0.4$ 의 경우에 파고분포와 평균수위의 변동특성을 나타낸 것으로, 그림의 (a), (b) 및 (c)는 파형경사  $H_i/L_i$ 의 변화를 나타내고 있다. 즉, 그림의 (a)는 비쇄파, (b)는 Spilling

형 쇄파, (c)는 Plunging형 쇄파에 대한 결과를 나타내고 있다.

실험결과를 보면, 잠제전면수역(해측수역)에서 부분중복파가 하는 것을 알 수 있다. 또한, 잠제의 해측경사 시작점부근에서 파고가 최대로 된 후 감소하는 경향을 나타낸다. 특히, 에너지의 일산효과가 기대되는 쇄파의 경우에 감소비율이 더 크게 나타난다. 해측으로부터 잠제의 해측경사 부근에 걸쳐서 사면에 의한

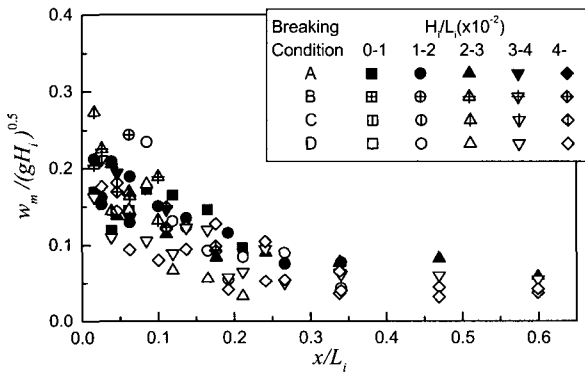


(a)  $R/h_i=0.2$

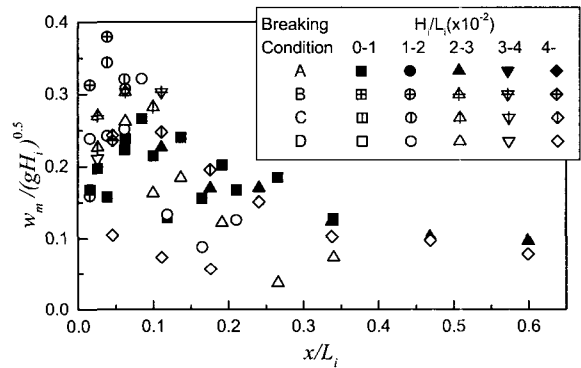


(b)  $R/h_i=0.4$

Fig. 4 Maximal wave forces in horizontal direction

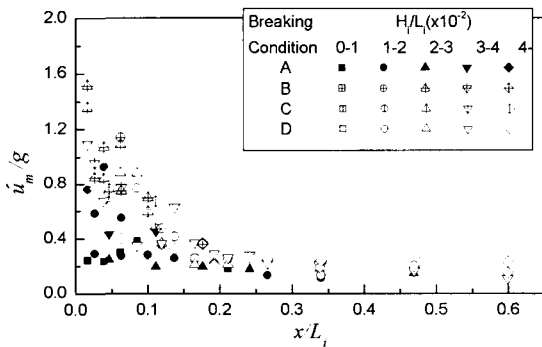


(a)  $R/h_i=0.2$

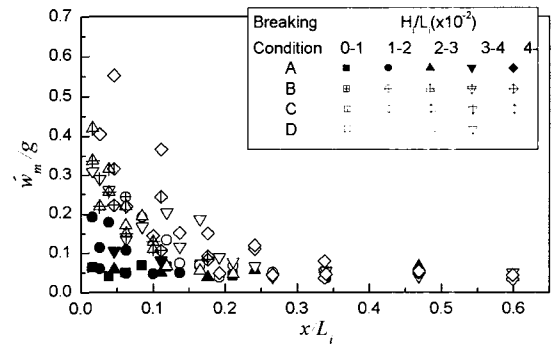


(b)  $R/h_i=0.4$

Fig. 5 Maximal wave forces in vertical direction



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 6 Maximal acceleration ( $R/h_i=0.2$ )

천수변형의 영향으로 파고가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, 구조물 전면에서의 평균수위는 정수위에 비해 약간 내려 가지만(wave set-down), 쇄파점 부근에서부터 상승(wave set-up)하고 있으며, 더욱이 쇄파규모가 커질수록 평균수위의 상승치가 커지는 것을 알 수 있다.

### 3.2 최대유속

#### (1) 수평방향 최대유속

Fig. 4는  $x/L_i$ 의 변동에 따른 무차원 최대 수평유속  $u_m/(gHi)^{0.5}$ 의 변동특성을 나타내고 있으며, Fig. 4의(a)는  $R/h_t=0.2$ , (b)는  $R/h_t=0.4$ 에 대한 결과이다.  $u_m/(gHi)^{0.5}$ 는 파형경사  $H/L_i$  및 쇄파조건에 따라서 약간의 차이는 있지만,  $x/L_i$ 에 의한 변동특성은 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 전반적으로,  $x/L_i$ 가 작은 영역에서 최대유속은 큰 값을 취하고 있다. 이것은 잠제해측 경사부분에서 수심 감소로 인한 천수변형의 결과로 파고의 증가와 더불어 유속이 커지는 것으로 판단된다. 또한,  $x/L_i$ 가 0.0~0.1의 범위에서  $u_m/(gHi)^{0.5}$ 은 최대치를 나타내고 있으며, 최대치를 취할 경우의 쇄파조건은 (B) 혹은 (C), 즉 충격쇄파력이 작용하는 경우이며, 쇄파시에는 수평방향 유속이 커지는 것을 알 수 있다. 비쇄파(쇄파조건 (A))의 경우,  $x/L_i$ 에 따른  $u_m/(gHi)^{0.5}$ 의 변화는 완만하며,  $x/L_i \geq 0.2$ 의 범위에서는 쇄파의 경우에 비해 비교적 큰 값을 취하고 있다. 이것은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 쇄파의 경우에는 쇄파후의 파고감쇠가 크므로 유속도 함께 작아지기 때문이다. 쇄파위치는 잠제 천단 상의 해측부근에 한정되어 있으며, Fig. 4로부터 알 수 있듯이 충격쇄파력을 발생시키는 쇄파조건 (B) 및 (c)의 발생영역의 대부분은  $x/L_i \leq 0.1$ 의 범위에 한정되어 있다.

#### (2) 연직방향 최대유속

Fig. 5는 무차원 최대 연직유속  $w_m/(gHi)^{0.5}$ 과  $x/L_i$ 의 관계를 나타낸 것이다. 최대 연직유속은 수평유속의 경우와 거의 같은 경향을 나타내고 있지만, 변동폭은 수평방향에 비해 작다. 이것은 측정된 연직상향의 유속이 투과성 잠제내부로부터의 유속이므로 잠제내부의 저항에 의한 에너지감쇠의 영향을 받을 뿐만 아니라, 천수변형에 의한 연직방향 유속의 증대도 수평방향에 비해 그다지 크지 않기 때문으로 판단된다.  $R/h_t$ 의 변화에 의한 차이를 보면, Fig. 5(b)  $R/h_t=0.4$  ( $h_t=10\text{cm}$ )의 경우가 Fig. 5(a)  $R/h_t=0.2$  ( $h_t=20\text{cm}$ )의 경우보다 투수층의 연직높이가 얇으므로 투수층내의 에너지감쇠도 작아진다. 따라서,  $R/h_t=0.4$ 의 경우의  $w_m/(gHi)^{0.5}$ 가  $R/h_t=0.2$ 의 경우보다 전반적으로 큰 값을 나타내는 것으로 판단된다.

#### (3) 최대가속도

Fig. 6(a)와 (b)는  $R/h_t=0.2$ 의 경우에 각각 수평과 연직의 무차원 최대가속도의 변동특성을 나타낸 결과이다. 수평방향의 무차원최대가속도  $\dot{u}_m/g$ 는 최대유속의 경우와 동일하게  $x/L_i \leq 0.1$ 의 범위에서 최대로 된다. 그 중에서도 충격쇄파력이 작용하는 쇄파조건 (B) 및 (C)의 경우의 가속도가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그 후의  $x/L_i$ 가 0.3부근까지 급격히 감소하며,  $x/L_i \geq 0.3$ 의 범위에서는 거의 변화가 없다. 한편, 연직방향의 무

차원최대가속도  $\dot{w}_m/g$ 는 수평방향에 비교해 값은 작지만, 거의 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.3 최대파력

#### (1) 수평방향 최대파력

Fig. 7은  $R/h_t=0.2$ 의 경우, 수평방향의 무차원최대파력  $F_{xm}/\rho gHiD^2$ 과  $x/L_i$ 의 관계를 나타낸 것으로, 그림의 (a), (b) 및 (c)는 직방체, 각추대 및 원추대에 대한 결과를 나타낸 것이다. 먼저,  $x/L_i$ 에 따른  $F_{xm}/\rho gHiD^2$ 의 변동특성을 보면,  $x/L_i \leq 0.1$ 에서 최대값을 가지며, 무차원 파력의 최대치는 쇄파조건 (B) 혹은 (C)의 경우, 즉 구조물에 큰 쇄파파력이 작용하는 경우에 발생한다는 것을 알 수 있다.

구조물의 형상에 관한 영향을 비교해 보면, 직방체, 각추대, 원추대의 순서로 파력은 작아진다. 특히, 수압면이 파랑의 진행방향에 대해 경사져 있는 각추대 및 원추대의 작용파력에 비하여, 수압면이 직립인 직방체 경우의 작용파력이 1.5~2.0배 이상이다. 게다가, 입사파에 대하여 곡면을 가지는 원추대의 경우에는 각추대에 비하여 0.7~0.8배 정도로 작용파력이 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 경사 수압면을 가지면서 곡율이 급격히 변화하지 않는 형상을 가진 구조물이 파력의 면에서 불 때 유리하다고 판단된다. 본 연구에서는 제시하고 있지 않지만,  $R/h_t=0.4$ 의 경우에서도 동일한 경향이 확인되었다.

#### (2) 연직방향 최대파력

연직방향의 무차원 최대파력  $F_{zm}/\rho gHiD^2$ 과  $x/L_i$ 의 관계를 Fig. 8에 나타냈다. 수평방향에 비해 파력이 작고,  $x/L_i$ 의 증가에 따른 파력의 변동폭도 적은 것을 알 수 있다. 또한, 수평방향의 경우와는 달리 비쇄파의 경우가 쇄파의 경우보다 연직방향 최대파력이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 잠제상에서는 수위변동의 영향이 크므로 수위변동에 기인하는 부력의 시간 변화가 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

연직방향의 최대파력은 원추대, 각추대, 직방체의 순으로 되어 있다. 각추대는 원추대에 비하여 압력의 작용면적인 저면이 크므로 파력의 차이가 발생된다고 판단된다. 한편, 직방체는 각추대와 같은 저면적이지만, 파력은 크다는 것을 알 수 있다. 연직방향으로 동일한 단면을 가지는 직방체의 경우에는 연직방향으로 단면이 줄어 드는 각추대에 비하여 국소적인 파변형이 크게 발생하기 때문에 이러한 것이 저면에 작용하는 압력에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.4 시간파형

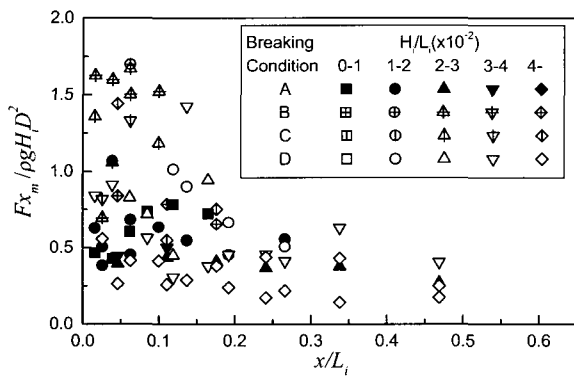
Fig. 9는 각추대를 설치한 경우, 수위변동  $\eta/\eta_m$ , 수평방향 유속  $u/u_m$ , 수평방향가속도  $\dot{u}/\dot{u}_m$  및 수평방향파력  $F_x/F_{xm}$ 의 시간파형을 나타내고 있다. (a)는 비쇄파의 경우, (b)는 쇄파의 경우이다. 비쇄파의 경우의 시간파형은 비교적 완만하지만, 쇄파의 경우는 파봉이 뾰족한 강한 비선형성을 가진 파형인 것을 알 수 있다.

각각의 물리량의 시간변화에 대해서 살펴보면, 비쇄파의 경우에 수평방향 유속 및 수위변동의 파봉의 위상은 거의 동일한 것에 비하여, 쇄파의 경우에 유속의 파봉은 수위변동의

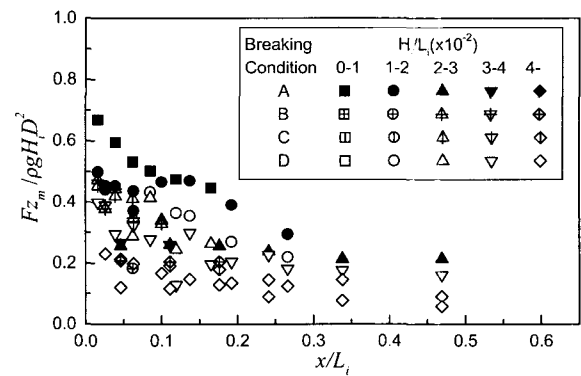
파봉보다 약간 늦다는 것을 알 수 있다. 이것은 파봉부분이 뾰족해 지면서 파봉부분의 이동속도가 커져 저면 근방의 유속변동보다도 수위변동의 위상이 약간 선행하기 때문으로 판단된다. 또한, 유속·가속도의 시간파형과 파력의 시간변화를 비교한 결과, 가속도와 파력에 대한 파봉의 위상은 대부분의 경우에 일치하고 있는 것을 확인하였다. 이것은 유속의 2승에 비례하는 항력에 비해 가속도에 비례하는 관성력이 지배적인 파력 성분인 것을 나타내는 결과이다.

### 4. Morison식의 적용성

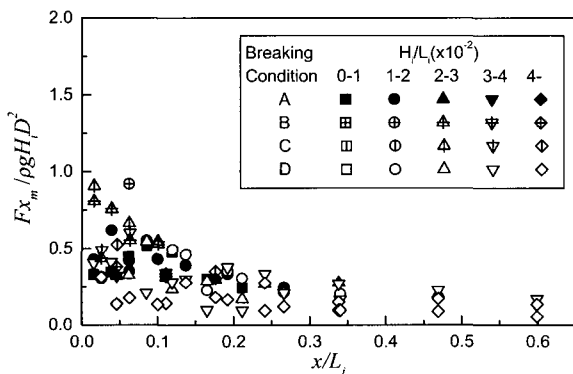
본 연구에서 대상으로 하고 있는 구조물은 입사파장에 비해 파진행방향의 대표길이가 충분히 작은 구조물이므로 Morison식이 작용파력의 산정식으로서 이용될 수 있다. 따라서, 본 장에서는 Morison식의 적용성에 대해서 검토한다.



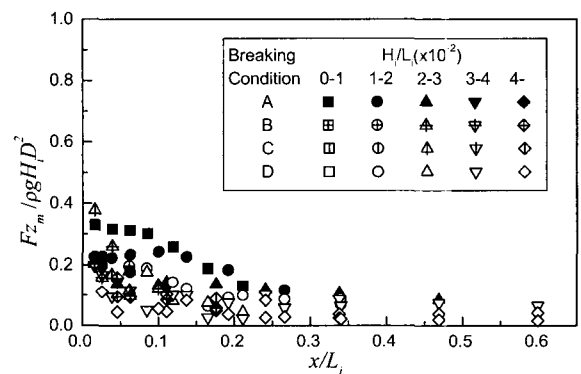
(a) Rectangular solid



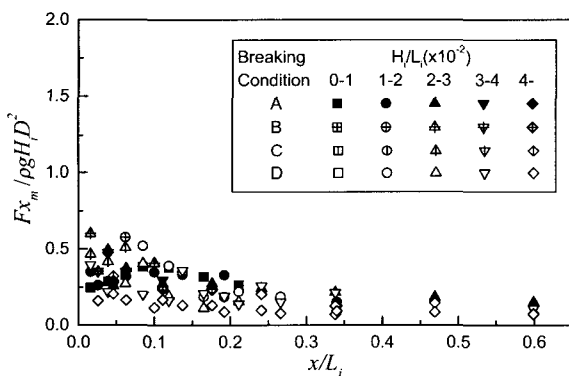
(a) Rectangular solid



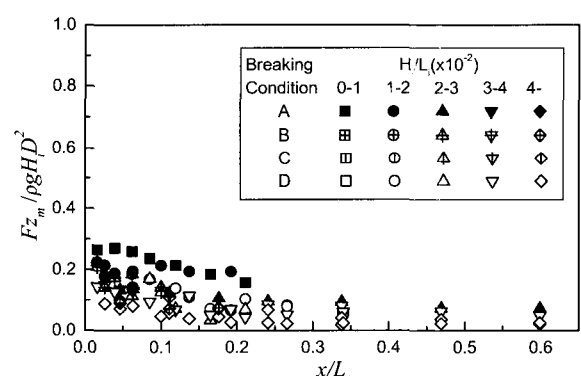
(b) Truncated pyramid



(b) Truncated pyramid



(c) Truncated cone



(c) Truncated cone

Fig. 7 Maximal wave forces in horizontal direction ( $R/h_i=0.2$ )

Fig. 8 Maximal wave forces in vertical direction ( $R/h_i=0.2$ )

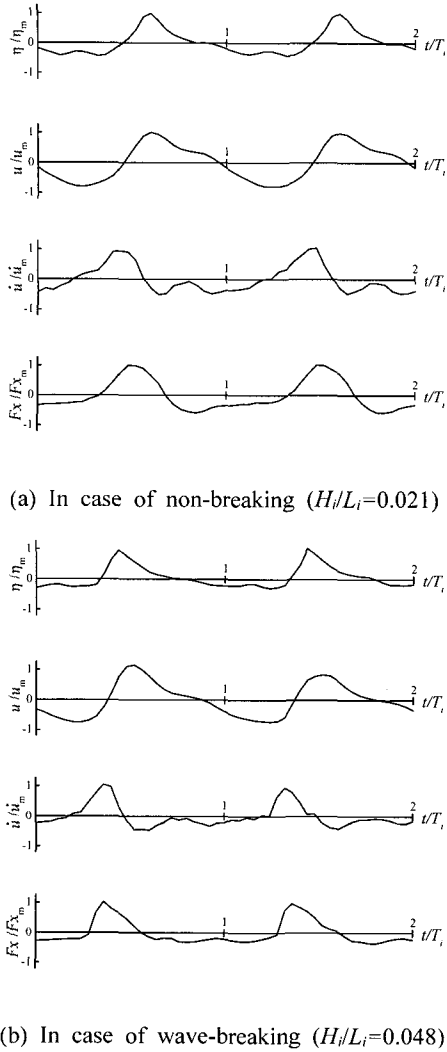


Fig. 9 Time variations of water surface, velocity, acceleration and wave forces (for a truncated pyramid)

4.1 수평방향

지금까지 원주 등에 작용하는 파력의 산정에 Morison식을 적용하는 경우에는 식(4)에 나타낸 것과 같이 정수심에서의 투영면적 및 체적을 고려하는 경우가 대부분이었다. 하지만, 잠제상과 같이 수심이 얇은 영역에 설치된 구조물에 작용하는 파력의 산정에는 수심에 비해 수위변동이 크기 때문에 Morison식에 수위변동을 고려한 투영면적과 체적을 이용할 필요가 있다고 판단된다. 따라서, 잠제상의 구조물에 작용하는 수평방향 파력산정식에 투영면적과 체적을 수위변동의 함수로서 다음의 식을 적용한다.

$$F_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho A(\eta) u |u| + C_{Mx} \rho V(\eta) \dot{u} \quad (5)$$

여기서,  $C_{Dx}$ 는  $x$ 방향의 항력계수,  $C_{Mx}$ 는  $x$ 방향의 관성력계수,  $A(\eta)$ ,  $V(\eta)$ 는  $\eta$  이하의 파진행방향으로의 투영면적과 체적,  $\eta$ 는 구조물중심위치에서의 수위변동을 나타낸다.

Fig. 10은  $x$ 방향의 수정Morison식, 식(5)를 이용하여 계산한 수평방향 파력의 계산결과와 실험결과의 비교를 나타내는 한 예로서, 각추대에 대한 결과이다. 그림에서 파선과 실선은 각각 구조물중심에서의 유속·가속도와 구조물 전면에서 측정된 유속·가속도를 식(5)에 적용한 계산결과이다. 파선의 계산결과는 실험결과와 크게 다르다는 것을 알 수 있으며, 이 같은 결과는 Fig. 11에서 알 수 있다. Fig. 11은 파력과 유속 및 가속도의 시간변화를 나타낸 것으로 유속과 가속도는 구조물 중심 위치에서의 값이다. 파력의 위상은 가속도의 위상보다 선행하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 구조물 중심위치에서 측정한 유속과 가속도는 파력이 구조물 전면에 충돌할 때, 최대가 되는 파력의 시간변화에 비하여 위상이 느리기 때문에 항력계수는 큰 -의 값이 되어 Fig. 10에서와 같은 결과가 얻어졌다고 판단된다.

파력의 발생기구로서 수파의 운동량이 구조물로의 충돌에 의한 역적의 변화로서 작용한다고 하면, 파력의 시간변화는 구

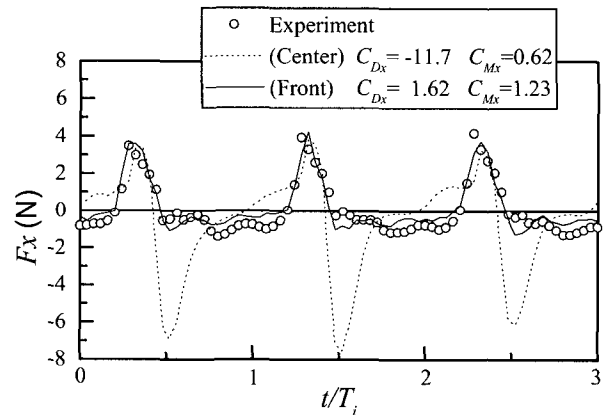


Fig. 10 Comparison between calculated and measured wave force for truncated pyramid

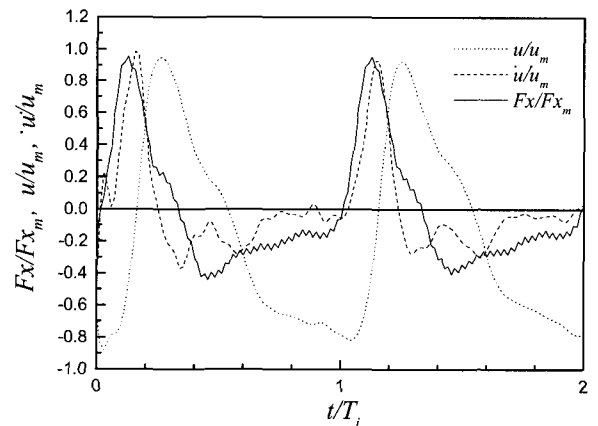


Fig. 11 Time variations of velocity, acceleration and wave force in case of breaking condition (B) for truncated pyramid

조물 전면에서의 가속도와 밀접한 관련이 있다고 예상할 수 있다. 따라서, Fig. 10에서와 같이 구조물 전면에서 측정된 유속과 가속도를 이용한 경우의 계산파력(Fig. 10의 실선)은 실험 결과와 양호하게 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 충격적인 쇄파력이 작용하는 경우에서도 실험치와 계산치의 일치도는 양호한 결과를 보였다.

따라서, 지금까지 구조물에 작용하는 충격쇄파력의 산정에 Morison식을 적용하는 경우에 항력과 관성력뿐만 아니라, 별도로 충격쇄파력의 효과를 고려할 필요가 있다고 지적되어 온 것에 대하여, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 구조물의 경우에는 Morison식에 구조물 전면의 유속과 가속도를 사용함으로써 잠제상의 구조물에 작용하는 충격쇄파력의 산정이 가능하다고 판단된다.

다음은, 파력계수에 미치는 수위변동의 영향을 살펴보기 위하여 정수심에서의 투영면적과 체적을 고려하는 식(4)와 수위변동의 함수로서 투영면적과 체적을 고려하는 식(5)를 이용하여 얻어진 각각의 항력계수 및 관성력계수를 비교·검토한다. Fig. 12와 13은 식(4)와 식(5)로부터 얻어진 각각의 항력계수 및 관성력계수와 K.C.수( $u_m T/D$ )는 구조물의 대표길이로, 직방체 및 각추대의 경우에는 저면의 변장, 원추대의 경우에는 저한 결과이다. 종래의 Morison식(4)에 의해 얻어진 Fig. 12(b)항력의 직경)의 관계를 나타내고 있으며,  $R/h_i=0.2$ 의 원추대에 대

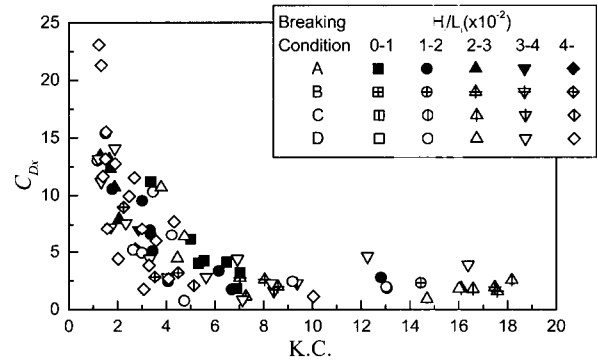
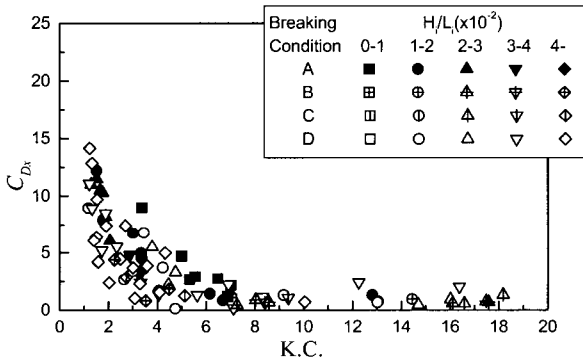
력계수와 Fig. 13(b) 관성력계수가 수정Morison식(5)(수위변동을 고려)에 의해 얻어진 Fig. 12(a) 항력계수와 Fig. 13(a) 관성력계수보다 넓게 퍼져 있으며, 수렴치도 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 잠제상에서는 천단수심에 비해 수위변동이 크기 때문에 최대파력이 발생할 때의 투영면적 및 배수체적은 크지만, 정수상태에서의 값을 이용함에 따라 실제의 투영면적 및 배수체적보다 과소평가되어 그에 따른 영향이 파력계수에 포함되어 수렴치가 커졌다고 판단된다.

이상의 결과로부터, 잠제상의 구조물에 작용하는 쇄파파력을 포함한 수평파력은 수위변동을 고려한 투영면적과 체적 및 구조물 전면에서의 유속과 가속도를 이용하면, 항력과 관성력의 합으로 표현되는  $x$ 방향의 수정Morison식(5)에 의해 산정될 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 연직방향

잠제상과 같이 수심에 비해 수위변동이 심한 영역에서는 연직방향 파력에 기여하는 부력의 변화도 중요한 것으로 판단되므로 항력과 관성력에 부력을 고려한 다음과 같은 식을 검토한다.

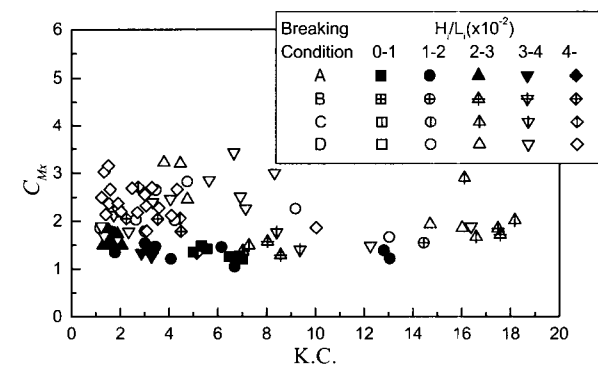
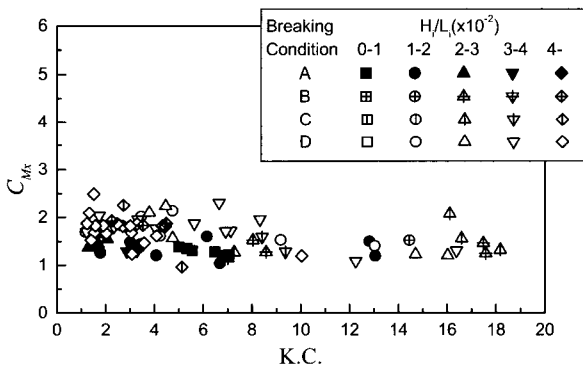
$$F_z = \frac{1}{2} C_{Dz} \rho A_z w |w| + C_{Mz} \rho V(\eta) \dot{w} + \rho g (V(\eta) - V(0)) \tag{6}$$



(a) In case that varying water surface level is considered

(b) In case that still water level is used

Fig. 12 Relationship between drag coefficients and K.C. number (for a truncated cone,  $R/h_i=0.2$ )



(a) In case that varying water surface level is considered

(b) In case that still water level is used

Fig. 13 Relationship between inertia coefficients and K.C. number (for a truncated cone,  $R/h_i=0.2$ )



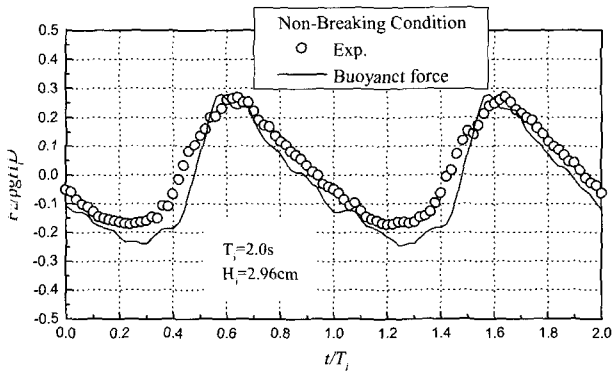
여기서,  $C_{Dz}$ 는 z방향의 항력계수,  $C_{Mz}$ 는 z방향의 관성력계수,  $A$ 은 구조물 저면면적,  $V(0)$ 은 정수상태의 구조물의 배수체적을 나타낸다.

Fig. 14는 연직방향 파력의 실험값과 식(6)의 우변 제3항의 파력과 비교를 나타내고 있으며,  $R/h_i=0.2$ 의 원추대에 대한 결과이다. 또한, Fig. 14(a)는 비쇄파의 경우, (b)는 쇄파조건 (C)의 충격쇄파력이 작용하는 경우를 나타내고 있다. 그림으로부터 파력 부력이 연직방향 파력을 양호하게 재현되고 있다는 것을 알 수 있으며, 부력이 연직방향 파력의 지배성분인 것을 알 수 있다. 그림이 복잡해지는 것을 피하기 위해 항력과 관성력을 나타내고 있지 않지만, 항력과 관성력이 차지하는 비율은 상당히 작다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 14(b)에서 파력의 최대치가 평탄하게 되어 있는 것은 파고가 큰 쇄파로 인한 율파의 발생으로 구조물이 잠수상태가 되어 부력이 일정하게 되기 때문이다.

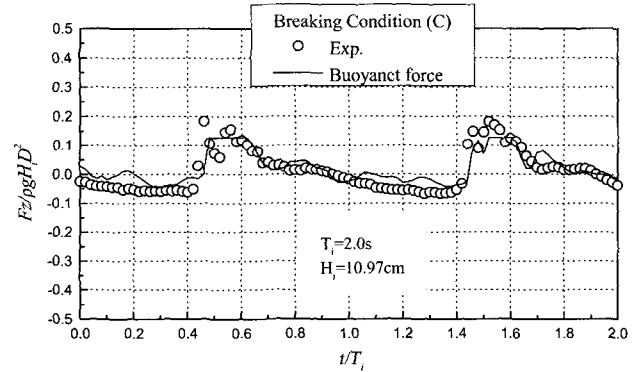
Fig. 15에는 구조물 저면중앙부에 설치한 압력계에 의해 측정된 압력을 저면전체에 걸쳐서 적분한 계산파력(이하, 압력적분치라고 칭한다)과 부력 및 연직방향파력의 실험치를 나타내고 있다. 또한, Fig. 15는  $R/h_i=0.2$ 의 직방체에 대한 결과를 나타내고 있으며, (a)는 비쇄파의 경우, (b)는 쇄파조건 (C)의 쇄파력이 작용하는 경우를 나타내고 있다. 여기서, 압력적분치는

구조물 저면중앙부에서 측정된 압력이 구조물 저면에 균일하게 작용한다는 가정에서 얻어진 값이다. Fig. 15(a)의 비쇄파의 경우에 저면압력 적분치는 비록 고주파의 진동을 포함하고는 있지만, 실험치 및 부력과 잘 일치하며 연직방향 파력에 미치는 정수압의 영향이 커다는 것을 나타내고 있다. 한편, Fig. 15(b)에 나타내고 있는 쇄파의 경우에 부력과 파력의 실험치는 양호하게 대응하고 있지만, 압력 적분치는 실험치를 과대평가하고 있는 경향이 있다. 이와 같은 결과는 파가 구조물을 율파(부력의 최대치가 짧은 시간동안 일정한 값을 가지는 것으로부터 알 수 있다)하고 있기 때문에 실제로는 구조물 상면에 연직하향의 힘이 작용하는 것이 되지만, 압력 적분치는 저면에 작용하는 연직상향의 파력성분만을 고려하고 있기 때문이라고 판단된다. 따라서, 연직방향 파력은 구조물 저면에 작용하는 압력의 기여가 크고, 그 압력은 거의 정수압에 의해 나타날 수 있다.

본 연구에서는 파력의 측정을 위해 잠제의 천단과 구조물 저면의 간격을 2mm정도 두고 실험하였다. 그러나, 실제의 표식암 구조물은 잠제 표층내에 약간 매몰된 상태로 시공되기 때문에 측정된 저면압력과 실제압력과의 사이에는 어느 정도 차이가 예상된다. 따라서, 구조물의 저면을 잠제내에 어느 정도 매몰한 상태에 대해 실험을 수행한 결과, 투과성 잠제와 같

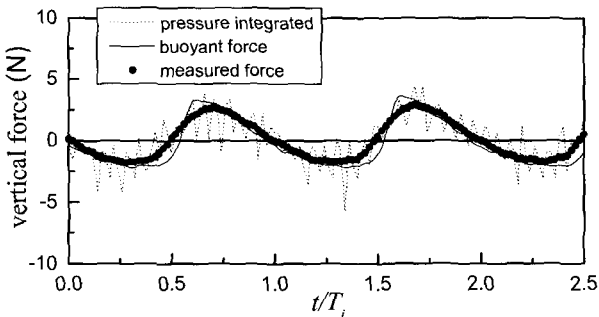


(a) In case of non-breaking ( $H_i/L_i=0.0068$ )

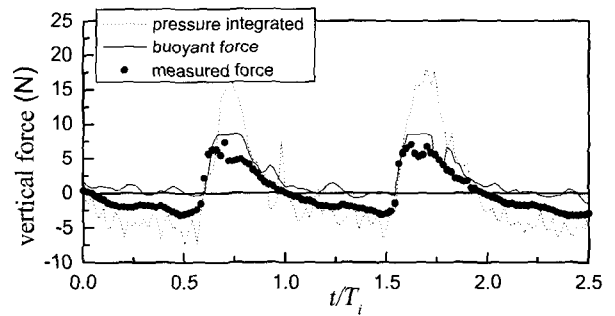


(b) In case of wave-breaking with overtopping (breaking condition (C),  $H_i/L_i=0.0252$ )

Fig. 14 Time variations of measured vertical wave force and buoyant force for a truncated cone ( $R/h_i=0.2$ )



(a) In case of non-breaking ( $H_i/L_i=0.0068$ )



(b) In case of wave-breaking with overtopping (breaking condition (C),  $H_i/L_i=0.0252$ )

Fig. 15 Time variations of measured vertical wave force, buoyant force and integrated pressure for a rectangular solid ( $R/h_i=0.2$ )

은 공극율이 큰 구조물에서는 압력의 전파성이 높으므로 거의 동일한 경향을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 부력의 시간변화, 즉 잠제상의 수위변동을 알면, 표식암에 작용하는 연직방향파력의 예측이 가능하게 된다.

### 5. 파력계수의 특성

전술한 바와 같이 부력이 연직방향 파력의 지배적인 파력성분이므로, 여기서는 수평방향 파력에 대한 항력계수 및 관성력계수에 대해서만 검토한다.

#### 5.1 항력계수

Fig. 16은  $R/h_i=0.2$ 의 경우에 K.C.수의 증가에 따른 항력계수  $C_{Dx}$ 의 변화특성을 나타내고 있다. 항력계수는 구조물의 형상에 관계없이 K.C.수가 약 5이하에서는 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분포하고, K.C.수의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Sarpkaya and Isaacson(1981)의 진동류에 대한 실험결과와는 반대의 경향을 나타내고 있는 반면, 수면근방의 부분파력에 대한 Iwagaki et al.(1973) 및 Ishida(1978)의 연구와는 동

일한 결과를 나타내고 있다. 한편, K.C.수가 5이상에서는 K.C.수가 증가함에 따라 거의 일정값에 수렴해 가는 경향이 있다. 그러나, 수렴치는 구조물의 형상에 따라 약간 다른 값을 가지며, 원추대, 각추대, 직방체의 순으로 크지는 것을 알 수 있다.

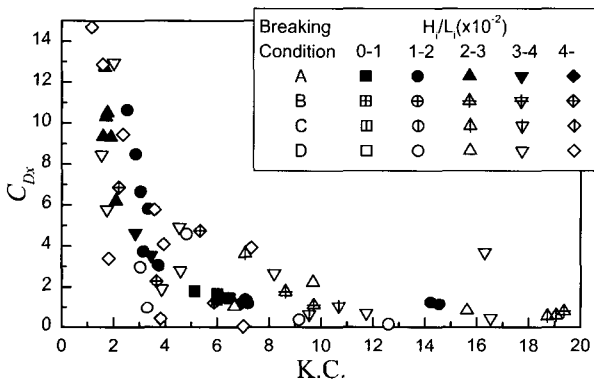
#### 5.2 관성력계수

Fig. 17은  $R/h_i=0.2$ 에 대한 관성력계수  $C_{Mx}$ 와 K.C.수의 관계를 나타내고 있다. 관성력계수는 직방체, 각추대, 원추대의 순으로 작아지지만, K.C.수의 증가에 따른 변동특성은 전반적으로 비슷하며, 항력계수에 비하면 K.C.수에 대한 의존성은 극히 작다는 것을 알 수 있다.

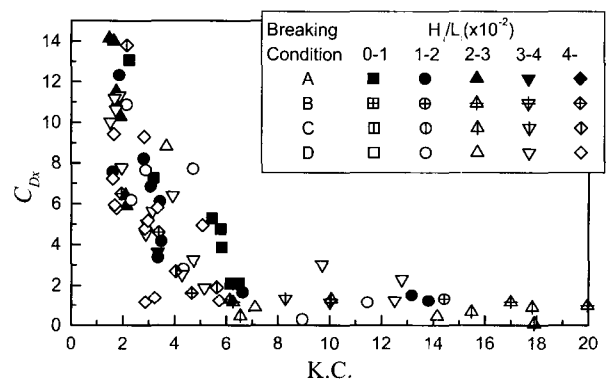
### 6. 결 론

본 연구에서는, 잠제상에 설치된 표식암(의암)에 대해 규칙파를 외력으로 작용하는 수리모형실험을 통하여 얻어진 파력의 시간변화, 최대치 및 파력계수 등의 기본특성을 표식암의 형상 및 쇄파조건과 관련해서 검토하였다. 수리모형실험의 해석결과로부터 얻어진 중요한 결론을 아래와 같이 요약한다.

(1) 무차원 최대 수평유속  $u_m/(gHi)^{0.5}$  및 무차원 최대 수평가

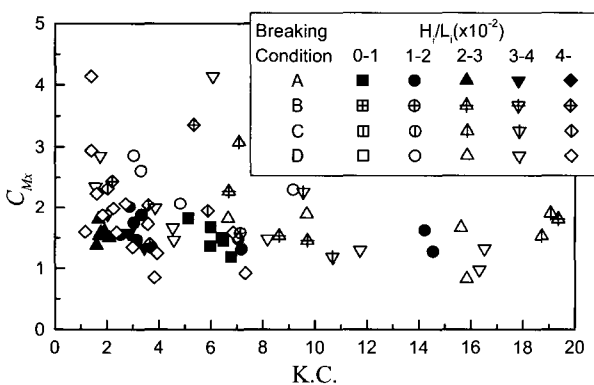


(a) For a rectangular solid

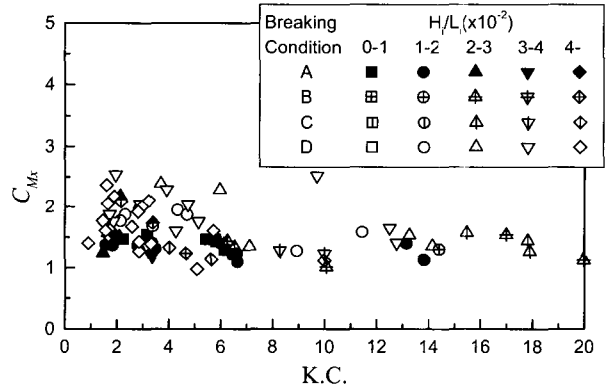


(b) For a truncated pyramid

Fig. 16 Relationship between drag coefficients and K.C. number ( $R/h_i=0.2$ )



(a) For a rectangular solid



(b) For a truncated pyramid

Fig. 17 Relationship between inertia coefficients and K.C. number ( $R/h_i=0.2$ )

속도  $\dot{u}_m/g$ 는 충격쇄파력이 작용하는  $x/Li < 0.1$ 의 범위에서 최대치를 나타낸다.

- (2) 무차원 최대파력은 구조물의 형상에 의해 원추대, 각추대, 직방체의 순으로 큰 값을 나타내며, 원추대의 경우와 비교하여 각추대의 경우는 약 1.2~1.3배, 직방체의 경우는 약 2배 이상의 값을 가진다.
- (3) Morison식에 구조물 전면에서의 유속과 가속도를 적용함으로써 충격쇄파력을 포함하는 수평방향파력의 산정이 가능하다. 연직방향 파력에 대해서는 부력의 영향이 지배적이며, 부력만으로 연직방향 파력의 예측이 가능하다.
- (4) 정확한 파력 및 파력계수를 산정하기 위해 Morison식 중의 투영면적과 체적을 수위변동의 함수로서 평가하는 것이 합리적이다.
- (5) 항력계수는 구조물의 형상에 관계없이 K.C.수가 약 5이하에서는 비교적 넓은 범위에 걸쳐 값을 가지며, K.C.수가 5이상에서는 거의 일정치에 수렴해가는 경향이 있다. 또한, 항력계수의 수렴치는 원추대, 각추대, 직방체의 순으로 크진다.
- (6) 관성력계수는 직방체, 각추대, 원추대의 순으로 작아지지만, 항력계수에 비하면 K.C.수에 대한 의존성은 매우 작다.

### 참 고 문 헌

배기성, 김도삼 (2001). "경사입사파랑중의 사석방파제에 의한 반사율과 투과율에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권 제1호, pp 31-35.

김도삼, 배기성 (2001). "혼성방파제의 케이슨에 작용하는 비선형 양압력분포에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 29-36.

Coastal Engineering Research Center (1975). Shore Protection Manual-Vol 2, pp 1-280.

Ishida, Y., Haranaka, S. and Kitahata, M. (1966). "Study of impulsive breaking wave forces on piles", Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol 5, No 6, p 30. (in Japanese)

Ishida, Y., Ikeda, T., Sasada, T. and Kishira, Y. (1972). "Study on design wave forces on circular cylinders erected upon reefs", Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol 11, No 4, pp 45-81. (in Japanese)

Keulegan, M.A. (1958). Laboratory study of breaking wave forces on piles, TM-106, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C.

Hiroi, I. (1919). "On a method of estimation the force of waves", Memoirs of Eng. Faculty, Imperial Univ. Tokyo, Vol 10, No 1, p 19.

Horikawa, K., Watanabe, A. and Katsui, H. (1973). "Breaking wave forces acting on circular cylinders", Proc. 20th Japanese Conf. on Coastal Eng., pp 37-42 (in Japanese)

Ishida, H. (1978). Study on wave forces acting on a circular cylinder, Doctoral Thesis, Kyoto Univ., pp 61-74. (in Japanese)

Iwagaki, T., Ishida, H. and Senda, T. (1973). "Irregular wave forces on a circular cylinder", Proc. 20th Japanese Conf. on Coastal Eng., pp 1-5. (in Japanese)

Keulegan, G.H. and Carpenter, L.H. (1958). "Forces on cylinder and plates in an oscillating fluid", J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol 60, No 5, pp 423-440.

Mitsuyasu, H. and Honda, T. (1973). "Breaking wave forces on circular piles", Proc. 20th Japanese Conf. on Coastal Eng., pp 43-47. (in Japanese)

Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A. (1950). "The wave force exerted by surface wave on piles, Petroleum Trans", AIME, Vol 189, pp 149-157.

Ross, C.W. (1955). Laboratory study of shock pressures of breaking waves, TM-59, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C.

Ross, C.W. (1959). Large-scale tests of wave forces on piling, TM-111, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C.

Sarpkaya, T. and Isaacson, M.Q. (1981). Mechanics of wave forces on offshore structures, Von Nostrand Reinhold, pp 92-102.

Sawaragi, T., Nochino, M. and Iwahashi, T. (1983). "On characteristics of partial impulsive breaking wave forces and total wave forces on circular piles in shallow water", Proc. 30th Japanese Conf. on Coastal Eng., pp 376-380. (in Japanese)

Von Karman, Th. (1929). The impact on seaplane floats during landing, NACA, TN321.

2002년 9월 23일 원고 접수

2002년 11월 28일 최종 수정본 채택