

碎波波力 결정을 위한 수치해석

심재설*, 전인식**, 이홍식***

1. 서론

해양구조물의 연직 원형파일에 작용하는 波力은 주로 항력과 관성력의 합으로 표시되는 Morison 식을 이용하여 결정하여 왔다. 그러나 Morison 식은 對稱形狀을 유지하며 비교적 완만히 변화하는 波에 대해서 적용이 가능하다. 구조물 部材에 쇄파가 작용할 경우, 쇄파파력은 항력과 관성력에 추가하여 강한 衝擊碎波力을 포함하게 된다. 本研究은 임의 二次元 傾斜海濱에서 경계요소법을 적용하여 碎波 内部點들의 水粒子 속도 및 가속도를 계산하고, 이들을 이용하여 碎波에 의한 쇄파파력을 계산하기 위한 모델기법을 수립한다.

2. 경사면 碎波場내의 수립자 운동성분의 계산

파가 경사면을 전파하면서 발생하는 비선형 파동장을 해석하기 위하여 유체영역을 Fig.1과 같이 설정하였다. 파는 경사면 이전에 설정한 일정길이의 평탄바닥 S_4 를 거쳐 경사면 S_3 에 진입하게 되며 쇄파는 이 경사면에 재현되게 된다. 파는 피스톤 형식의 수치조파기에 의하여 발생하며 조파기는 운동경계 S_1 에 해당한다. 경계요소법의 목적은 임의 시간 t 에서 자유수면 S_2 상 節點들의 위치 (X, Z) 와 유체영역 임의점에서의 속도포텐셜 ϕ 를 결정하는데 있다. 그 자세한 기법에 대해서는 이미 한국해양연구소(1997)에서 기술하였으며 여기에서는 생략하기로 한다. 계산과정에 대해서는 각 계산단계마다 검색하여 자유수면 S_2 에서 경계요소의 인접 절점의 전도($X_j \geq X_{j+1}$)가 발생할 때를 계산 종료점으로 하였다.

Fig.2는 경계요소법에 의하여 계산된 계산종료점에서의 파동장을 보여준다. 파조건으로서 Honda and Mitsuyasu(1974)의 실험입력조건을 사용하였다. 쇄파점은 그림에서 보여주는 바와 같이 경사면

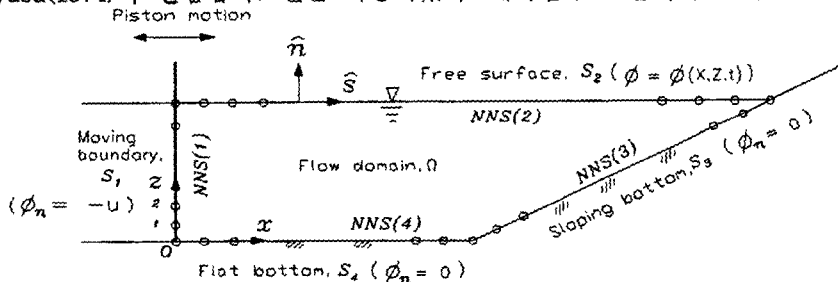


Fig.1 Flow domain and boundary conditions for the numerical analysis for breaking waves on sloping bottom.

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터

** 건국대학교 토목공학과

*** 중앙대학교 토목공학과

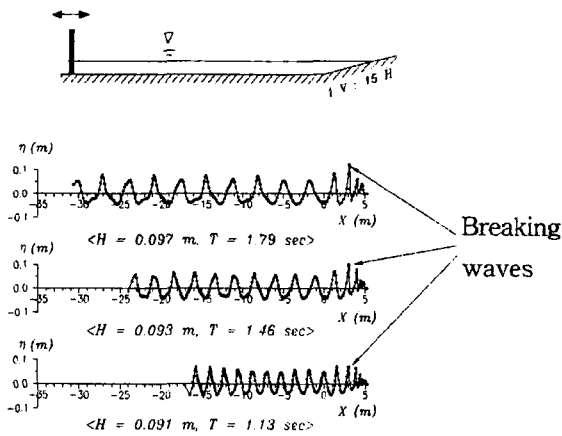


Fig.2 Overall wave patterns captured at particle the instant of breaking waves.

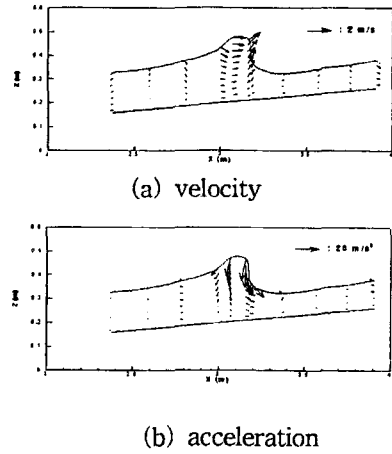


Fig.3 Vector diagrams of water kinematics under breaking wave.

($H_p = 0.097 \text{ m}$, $T = 1.79 \text{ sec}$).

에서 최대파고점으로 선택하였다. Fig.3은 쇄파점하에서의 수립자의 속도와 가속도의 공간변화를 보여준다.

3. 쇄파파력의 무차원화

연직파일에 작용하는 쇄파파력을 일반적으로 제시하기 위하여 파력과 쇄파제원과의 관계를 무차원화할 필요가 있다. 여기에서는 무차원관계를 설정하기 위하여 다음과 같은 Morison식을 이용하기로 한다.

$$\begin{aligned}
 f &= f_i + f_d \\
 &= \rho C_i \frac{\pi D^2}{4} a_x + \frac{1}{2} \rho C_d D |u| u
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, f , f_i , f_d = 단위 길이당 작용하는 총파력, 관성력, 항력

C_i , C_d = 관성력 계수, 항력계수

ρ = 물의 밀도

D = 파일의 직경

u , a_x = 수립자 속도, 가속도의 수평성분

수심 h 에 위치한 연직파일에 작용하는 전파력은 다음과 같은 무차원 관계로 나타낼 수 있다.

$$\hat{F}_i = \frac{F_i}{\rho g D^2 H_o} = \frac{\pi C_i}{8} \left(\frac{H}{h} \right) \left(\frac{h}{H_o} \right) f_1(kh, \frac{\eta}{h}) \sin \theta \tag{2}$$

$$\hat{F}_d = \frac{F_d}{\rho g D^2 H_o} = \frac{C_d}{16} \left(\frac{H_o}{D} \right) \left(\frac{H}{h} \right)^2 \left(\frac{h}{H_o} \right)^2 f_2(kh, \frac{\eta}{h}) \cos \theta | \cos \theta | \tag{3}$$

식 (2), (3)에서 무차원수 H/h 는 분산관계식을 이용하여 무차원 변수 H_o/L_o , h/H_o 의 함수형태로 나타낼 수 있으므로 무차원 全波力의 최대치 \hat{F}_m 은 결국

$$\hat{F}_m = (\hat{F}_i + \hat{F}_d)_m = function\left(\frac{H_o}{L_o}, \frac{D}{H_o}, \frac{h}{H_o}, \theta_{Fm}\right) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, θ_{Fm} 은 최대 무차원 파력이 발생하는 θ 값이다

上記와 동일한 방식으로 바닥에 대한 파력의 모멘트의 최대치에 대해서도 다음과 같은 무차원 관계식을 설정할 수 있다.

$$\hat{M}_m = (\hat{M}_i + \hat{M}_d)_m = function\left(\frac{H_o}{L_o}, \frac{D}{H_o}, \frac{h}{H_o}, \theta_{Mm}\right) \quad (5)$$

여기서, θ_{Mm} 은 최대 무차원 모멘트가 발생하는 θ 값이며, 파력에서의 θ_{Fm} 과는 다른 값을 갖는다.

4. 쇄파력의 계산

4.1 입력조건외 설정

본 수치해석 기법에 의하여 계산된 쇄파파력의 유효성을 검증하기 위하여 Honda and Mitsuyasu(1974)의 실험과 제원을 이용하였다. 이 실험은 이차원 수조(13.4m(길이) x 0.6m(폭) x 0.8m(깊이)) 내에서 造波하여 평탄바닥을 거쳐 경사도 $S_b = 1/15$ 의 경사면을 거슬러 올라가며 쇄파하는 식으로 수행하였다. Honda and Mitsuyasu의 실험은 경사면상 최대파력 및 모멘트를 제시하고 있으며, 본 연구에서는 이들을 쇄파 파력으로 간주하고 쇄파 파력에 대한 수치해석 결과를 검증하는데 이용하였다.

상기 실험의 파조건은 Table 1과 같으며, D 는 실험에 사용된 원형파일의 직경을 의미하고 T 는 파주기이다. H_p 와 h_p 는 각각 2차원 수조의 평탄바닥에서의 파고와 수심을 의미한다. L_o , H_o 그리고 H_o/L_o 는 각각 T 와 H_p 에 대한 심해파 파장, 파고 그리고 파형경사를 뜻하고,

\hat{F}_m^e 와 h_{F_m} 은 무차원 최대파력과 발생수심을, \hat{M}_m^e 와 h_{M_m} 은 무차원 최대모멘트와 발생수심을 의미한다. 또한 H_{EB} 와 h_{EB} 는 이 실험과 조건들을 이용하여 경계요소법으로 구한 쇄파고와 쇄파수심을 각각 나타내고 있다.

Table 1. Input wave conditions adapted from Honda and Mitsuyasu(1974).

No.	D	T	H_p	h_p	L_o	H_o	H_o/L_o	\hat{F}_m^e	h_{F_m}	\hat{M}_m^e	h_{M_m}	H_{EB}	h_{EB}
	(m)	(sec)	(m)	(m)	(m)	(m)			(m)		(m)	(m)	(m)
1	0.048	1.79	0.097	0.35	5.0	0.1	0.02	3.13	0.125	4.66	0.123	0.151	0.146
2	0.048	1.46	0.093	0.35	3.33	0.1	0.03	2.76	0.139	3.07	0.143	0.124	0.149
3	0.048	1.13	0.091	0.35	2.0	0.1	0.05	1.81	0.115	2.45	0.117	0.094	0.148

4.2 碎波波力과 모멘트의 계산

일반적으로 쇄파에 의한 연직 원형 파일에 작용하는 충격 쇄파력(impact force due to breaking waves)은 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$f_s = \frac{1}{2} \rho C_s D u^2 \quad (6)$$

여기서, f_s 는 원형부재의 단위길이당 충격 쇄파력, C_s 는 충격력 계수, u 는 수립자의 충돌속도이다.

본 수치해석에서는 合田良實 等(1966)의 연구를 참조하여 쇄파력의 작용구간을 두 가지 즉, 충격쇄파력의 작용구간(range of impact force)과 Morison 식의 적용구간(range of Morison formula)으로 구분하였다(Fig.4 참조).

구조물 前面에서 쇄파가 발생할 때 水粒子의 접근속도는 위치에 따라 달리 나타난다. 따라서 여기에서는 충격쇄파력 작용구간을 쇄파의 最頂點을 통과하는 연직선중에서 Fig.4의 H_{EB} 에 해당하는 구간으로 설정하고 이 구간에서 이미 계산된 수립자 유속의 수평성분을 이용하였다. 식 (6)의 충격력 계수 C_s 는 von Karman(1929)의 최대 충격력 계수인 $C_s = \pi$ 를 사용하였다. Morison식 적용구간(H_{EB} 이하에서 바다까지의 구간)에 대해서도 수립자의 속도 및 가속도는 경계요소법의 계산결과를 이용하였으며, 항력계수와 관성력은 각각 안전측면에서 $C_d = 1.2$, $C_i = 2.0$ 을 채택하여 사용하였다.

상기와 같이 각 구간별로 단위길이 당 발생하는 충격쇄파력, 항력 그리고 관성력을 구하고 이들을 각 구간길이로 연직적분하여 더하면 쇄파가 원형실린더에 가하는 全波力 즉, 碎波波力(breaking wave force)과 이에 따른 모멘트를 결정할 수 있다. 즉,

$$F_I = F_d + F_i + F_s \quad (7)$$

$$M_I = M_d + M_i + M_s \quad (8)$$

여기서, 하첨자 I , d , i , s 는 각각 쇄파파력, 항력, 관성력 그리고 충격쇄파력을 의미한다.

Fig.5는 Table 1의 No.1 파에 대한 원형파일 및 파제원에 대한 쇄파조건(쇄파고, 쇄파수심)을 그대로 선형파 이론에 적용하여 모리슨 식으로 계산한 결과와 본 수치모델 결과를 이용하여 계산한 쇄파파력을 수심별로 도시한 것이다. 그리고 Table 2는 Table 1의 원형파일 및 파제원에 대한 본 수치모델 결과를 이용하여 계산한 파력 및 모멘트의 배분관계를 보여준다. 세 파랑조건 공히 충격쇄파

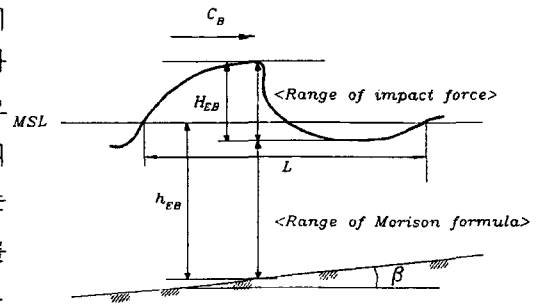


Fig.4 Division of wave field for calculating the impact force due to breaking waves.

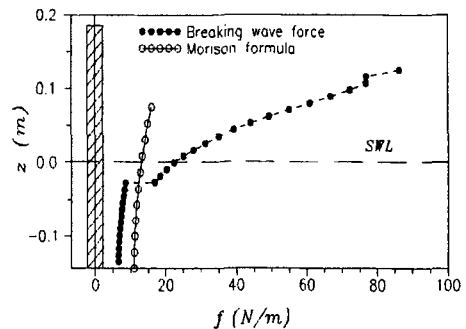


Fig.5 Vertical distribution of the wave force per unit length.

력 F_s 가 쇄파파력 F_I 중에서 차지하는 비중이 항력 F_d , 관성력 F_i 보다 월등히 큼을 알 수 있다.

Table 2. Wave forces and moments under the impact of breaking waves.

No.	D (m)	F_d (N)	F_i (N)	F_s (N)	F_I (N)	M_d (N-m)	M_i (N-m)	M_s (N-m)	M_I (N-m)
1	0.048	0.527	0.332	6.908	7.767	0.039	0.021	1.468	1.528
2	0.048	0.312	0.966	4.506	5.784	0.025	0.072	0.924	1.020
3	0.048	0.367	0.131	2.572	3.070	0.030	0.009	0.484	0.523

Table 1의 파조건 No.1 - No.3은 공히 무차원 변수 D/H_o (≈ 0.48)과 h_{EB}/H_o (≈ 1.48)은 거의 일정한 값이며, 심해파 파형경사 H_o/L_o 만 변함을 알 수 있다. 심해파 파형경사 H_o/L_o 의 변화에 따른 무차원 쇄파파력 \hat{F}_I , 모리슨식의 최대파력 \hat{F}_m^M , 그리고 Table 1에서의 실험결과 \hat{F}_m^e 의 변화를 Fig.6에 도시하였다. 전반적으로 본 수치해석에 의한 계산치와 Honda and Mitsuyasu의 실험치가 잘 일치한다. 다만, No.3의 파조건 즉, $H_o/L_o = 0.05$ 에서 파력과 모멘트 공히 다소의 차이가 발견된다. 이에 대한 이유는 이 파 조건의 수치해석에서 쇄파고가 다른 파 조건에 비하여 상대적으로 너무 작게 계산된데 기인된 듯하다(Table 1 참조). 본 수치해석은 자유수면에서 임의점이라도 파면이 하류쪽을 향하여 직립상태를 보이면 계산이 종료되는 것으로 되어 있다. 수치조파기가 작동하여 主波가 도달하기 전에 발생하는汀點 쇄파를 방지하기 위한 근사적 장치를 설정하였지만, 상기 No.3 파는 이 장치의 불완전 작동으로 인하여 정점쇄파가 발생하여(조금은 지연되었지만) 완전히 성숙되지 못한 쇄파가 도출된 것으로 보인다.

Fig.6에서 심해파 파형경사 H_o/L_o 의 증가에 따라 무차원 파력 및 모멘트는 감소성향을 보이며 이는 Honda and Mitsuyasu(1974)의 실험결과와도 일치한다. 본 수치해석에 의한 결과치와 모리슨식의 계산치를 비교하여 보면 전 파형경사의 범위에 걸쳐 전자가 후자보다 월등히 크며, $H_o/L_o = 0.02$ 에서 파력은 최고 약 3배, 모멘트는 최고 약 5배에 달함을 알 수 있다. 파력보다 모멘트에서 상

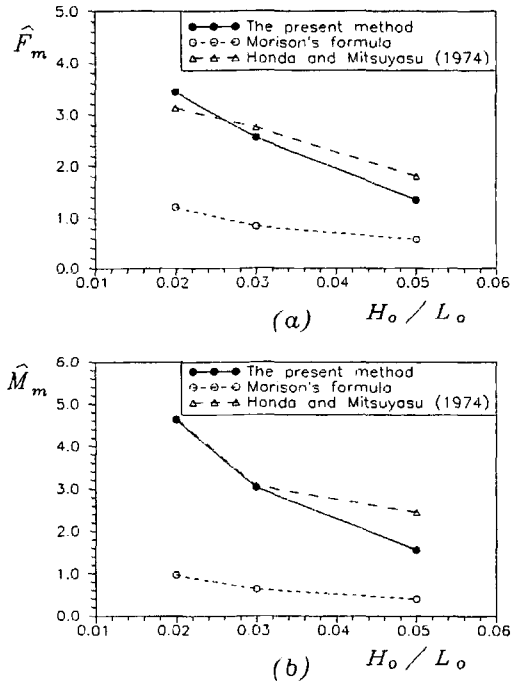


Fig.6 Comparison of the nondimensional impact force (a) and moment (b) ($D/H_o = 0.48$, $h_{EB}/H_o \approx 1.48$).

대적으로 큰 차이를 보이고 있는데 이는 쇄파에 의한 충격쇄파력이 수면근처에 집중되어 있기 때문이다. 파력과 모멘트 공히 수치해석 결과치와 모리슨 식 계산치는 파형경사가 증가하면서 그 차이가 감소한다.

5. 결론 및 토의

상기의 모델 결과와 Honda and Mitsuyasu(1974)의 실험치(Table 1)와의 비교, 분석에서 본 쇄파파력 결정기법이 매우 유효함을 알 수 있다. 그리고 모델 결과치와 모리슨 식의 계산치가 파력과 모멘트 공히 상당정도의 차이를 보임을 알 수 있다. 본 분석에서 모리슨 식의 적용을 위하여 본 파동장 수치해석기법에서 계산된 쇄파고와 쇄파수심을 이용하였다. 만약, 선형파 이론으로 경사면 파동장 즉, 천수변형을 고려한 해석 결과를 사용하여 Morison 식으로 계산된 파력과 모멘트를 본 모델 결과와 비교하였다면 이들의 차이가 더욱 더 크게 발생하였을 것이다. 이 경우 Honda and Mitsuyasu (1974)는 파력은 5배, 모멘트는 10배 정도의 차이를 보이는 것으로 지적하였다. 이와 같은 사실은 쇄파파력 계산시에 도입한 쇄파부분의 유속분포와 충격력 계수의 가정에 의한 오차를 감안하더라도 쇄파대에 위치한 구조물 설계시 충격쇄파력의 중요성을 간과해서는 안된다는 것을 시사하고 있다. 즉, 단순히 Morison 식에 의한 설계는 상당한 정도의 과소설계를 초래할 수 있는 것이다.

임의 構造物에 작용하는 衝擊碎波力은 그 크기는 매우 크나 일반적으로 그 작용시간이 매우 짧은 것으로 지적되고 있다. 구조물 局部部材를 설계할 때는 이 충격쇄파력을 이용하는 것이 권장되고 있으나(Faltinsen, 1990), 구조물 전체의 安定度 및 基礎地盤의 설계를 위한 靜的荷重으로 보기는 어렵다. 따라서 後者の 경우에는 쇄파파력의 작용에 의한 구조물의 動的解析을 수행하는 것이 바람직하다. 본 수치해석에서는 연직 원형파일에 작용하는 순간 최대 碎波波力을 계산하였다. 그러나 쇄파파력 작용에 의한 구조물의 動的解析을 수행하기 위해서는 쇄파파력의 作用履歷을 파악하여야 한다. 또한 일반적인 해양구조물이 鉛直部材를 비롯하여 水平 및 傾斜部材로 구성되는 것을 감안할 때, 이와 같은 모든 형태의 部材에 대한 瞬間 碎波波力 및 作用履歷의 도출에 대한 연구가 향후 필요하리라고 본다.

參考文獻

- 韓國海洋研究所, 1997. '97 이어도 綜合海洋科學基地 구축 사업보고서, 海洋水産部.
- Faltinsen, O.M., 1990. Sea Loads on Ships and Offshore Structures, Cambridge University Press, pp.282-315.
- Honda, T. and Mitsuyasu, H., 1974. Experimental study of breaking wave force on a vertical circular cylinder, Coastal Engineering in Japan, vol. 17, pp.59-70.
- von Karman, T., 1929. The Impact of Sea Plane Floats during landing, N.A.C.A. TN 321, Washington.
- 合田良實, 原中祐人, 北畑正記, 1966. 直柱に動く 衝擊碎波力の研究, 第5卷6號, 運輸省港灣技術研究所.