

해저 석유개발을 위한 해양구조물의 기본 설계/해석 및 실험기법 개발 - 해양구조물에 작용하는 파랑하중 산정에 관한 연구

조규남 · 이근무 · 최영철
홍익대학교 조선해양공학과

A Study on the Determination of Wave Load Acting on Offshore Structures

K. N. CHO, K. M. LEE AND Y. C. CHOI

Dept. of Naval Arch. & Ocean Eng., Hong Ik Univ., Chochiwon Campus, Chochiwon, Chungnam 339-701, Korea

KEY WORDS: Wave load 파 하중, Breaking wave 쇄파, Morison's equation 모리슨 식, Impact load 충격 하중

ABSTRACT: In this paper, various methods of determining of wave loads acting offshore structures including impact load due to breaking wave are studied and corresponding model test was performed. In the theoretical approach, wave load by nonbreaking wave and impact load by breaking wave is determined by Morrison's equation, Goda's equation and impact wave equation. In the experimental approach, wave load by nonbreaking wave acting on cylindrical pile used in offshore structures is determined by measuring the strain on a cylindrical pile and compared with theoretical value. In the numerical approach, impact load by breaking wave acting on a modeled cylindrical pile is calculated by using ANSYS, FEM program and compared with theoretical value. It is found that the experimental and numerical results are comparable to theoretical results. Thus, the determination of wave load acting on offshore structures can be obtained by a proposed method and it is acceptable.

1. 서 론

바다에서 제 기능을 수행하는 해양구조물의 설계, 해석시에는 파도에 의한 파랑하중이 매우 중요한 인자가 된다. 파랑하중에는 일반적인 파에 의한 하중과 파가 부서지면서 생기는 쇄파에 의한 충격하중으로 나뉘어지며 본 논문에서는 이론적, 실험적, 수치해석적인 방법으로 파랑하중을 구하였다(Kaplan and Silbert; 전 등).

이론적인 방법에서는 원통형기둥에 작용하는 일반적인 파에 의한 하중과 쇄파에 의한 충격하중을 산정하였다. 일반파에 의한 하중은 Morison 식 및 Goda 식에서 얻어진 항력 및 관성력의 합으로 구하였고 충격하중은 Morison 식 및 Goda 식에서 얻어진 값에 Falinsen 등이 제시한 충격파력식을 통해서 구한 충격파력값을 합산하여 산정하고 이를 수치해석에 의해서 구해진 충격하중과 비교하였다. 또한 쇄파가 발생하지 않은 일반파에 의한 파력을 실험에 의해서 구하고 이를 Morison's equation 및 Goda의 근사식으로부터 구한 이론치와 비교하였다(Falinsen et al.; Goda, 1985).

실험적인 방법에서는 한국해양연구소 선박해양공학 분소 소재의 해양공학수조에서 원통형 기둥을 수조 바닥에 고정시켜 놓고 쇄파가 생기지 않은 규칙파에 의해 원통형 기둥에 작용하는 파랑하중을 산정하고 Morison's equation 및 Goda의 근사식에서 구한 항력 및 관성력을 합한 전체파력값과 비교하였다(Karman, 1992; 승, 1996; 윤, 1996).

수치해석적 방법에서는 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 가지고 쇄파가 발생하도록 바닥구배가 각각 1/10, 1/20, 1/30, 1/50인 2차원 수조와 바닥구배가 있는 경사면에 2차원 원기둥이 설치되어 있는 경우의 파랑하중을 산정하고, 이론치와 비교하였다(조, 1995; ANSYS).

Fluid79와 Beam3 요소로 모델링을 하고 유체(fluid)와 고체(solid)간의 상호작용(Interaction)을 해석하기 위하여 유체의 절점과 고체의 절점을 Coupling하였다. Transient Dynamic analysis로 해석을 하였고 해석시 각 절점에서의 집중질량근사법을 쓰지 않은 The full method로 보다 정확한 계산이 가능하도록 하였다(ANSYS, Logan, 1997).

2. 이론적 접근 방법

2.1 충격하중 산정

일반적으로 원기둥에 작용하는 쇄파를 Fig. 1와 같이 가정하였다. 쇄파 발생시 원기둥에 항력, 관성력 및 쇄파에 의한 충격파력이 모두 발생하기 때문에 충격 하중은 다음과 같이 항력과 관성력과 쇄파에 의한 충격파력을 합한 값으로 나타내었다.

$$F_T = F_D + F_M + F_I \quad (1)$$

여기서, F_T 는 쇄파 발생시 전체 파력, F_D 는 항력, F_M 는 관성력, F_I 는 충격파력을 나타낸다(Karman, 1992; 윤, 1996).

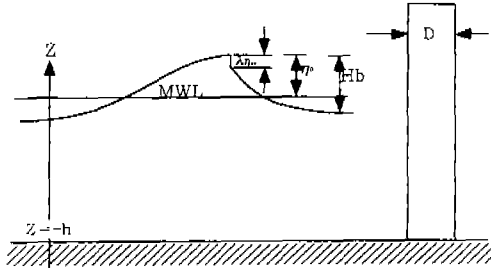


Fig. 1 Model of Breaking wave

2.1.1 항력 및 관성력

1. Morison's equation에 의한 방법

해양구조물이 수평부재 치수가 파장에 비해 매우 작은 관계로 입사파의 운동학적 특성이 교란되지 않는다고 가정하였을 경우 원기둥에 작용하는 최대파력 $(F_D)_{max}$ 은 Fig. 2에서 보여진 바와 같이 파봉이 원기둥에 작용할 때 작용한다. 이때의 최대 관성력 $(F_M)_{max}$ 및 최대항력 $(F_D)_{max}$ 은 다음과 같이 주어진다. 여기서 C_D 와 C_M 은 원기둥의 경우 평균값인 1.0, 2.0을 적용하였나(조, 1995; 윤, 1996).

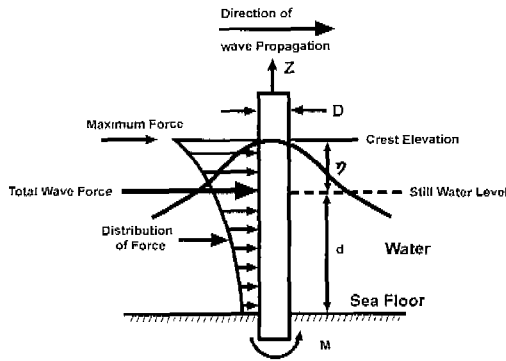


Fig. 2 Distribution of Wave force

$$\begin{aligned}
 (F_D)_{max} &= \int_{-d}^{\eta} dF_D \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot \int_{-d}^{\eta} u|u| dz \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot H^2 \cdot \left(\frac{1}{H^2} \int_{-d}^{\eta} u|u| dz \right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot H^2 \cdot K_D
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 (F_M)_{max} &= \int_{-d}^{\eta} dF_M \\
 &= \rho \cdot C_M \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \int_{-d}^{\eta} \frac{du}{dt} dz \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_M \cdot D^2 \cdot H \cdot \left(\frac{\pi}{2H} \int_{-d}^{\eta} \frac{du}{dt} dz \right)
 \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_M \cdot D^2 \cdot H \cdot K_M \tag{3}$$

$$(F)_{max} = K \cdot (F_D)_{max} \tag{4}$$

여기서 C_M : mass or inertia coefficient

C_D : drag coefficient

ρ : density of fluid

D: diameter

H: wave height

K_M : inertia force factor

K_D : drag force factor

K: $(F)_{max}/(F_D)_{max}$

2. Goda의 근사식에 의한 방법

부재가 수면에 직립한 경우 항력 및 관성력의 합은 불입자 운동 수평성분을 이용하여 파의 작용범위에 걸쳐 적분함으로써 구할 수 있다. 그 때의 최대 파력은 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다(Goda, 1985).

$$(F_D)_{max} = \gamma_0 \cdot C_D \cdot D \cdot H^2 \cdot K_D \tag{5}$$

$$(F_M)_{max} = \gamma_0 \cdot C_M \cdot D \cdot H^2 \cdot K_M \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 (F)_{max} &= (F_D)_{max} + \frac{(F_M)_{max}^2}{4(F_D)_{max}} \\
 &: 2(F_D)_{max} > (F_M)_{max}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$(F)_{max} = (F_M)_{max} : 2(F_D)_{max} < (F_M)_{max} \tag{8}$$

여기서, γ_0 : 해수의 비중량

C_D, C_M : 항력계수 및 관성력 계수

K_D, K_M : 항력 및 관성력 계수

D : 원주의 직경

H : 파고

2.1.2 충격파력

충격파력 계산방법은 Goda에 의해서 작용시간의 함수로 표현된 충격압을 구하여 계산하는 방법이 있으나 이 식은 작용시간에 대한 함수로 나타나 있어 일반적으로 사용하기는 어렵고, 시간에 반비례하기 때문에 대단히 큰 값을 줄 수 있다(Goda, 1985). 한편 Minikin 공식에 의한 쇄파의 충격압 계산방법도 하나의 방법으로 생각될 수 있으며, 이 경우 일반적으로 생각한 파압보다 3배에서 10배의 크기로 나오기 때문에 기준으로 삼기는 어려운 점이 있다. 본 논문에서 사용된 충격파력 계산식은 보수적인 값을 줄 수 있으나 수치해석치와 비교 검토하기는 적절할 것으로 사료되어 식(9)에 의한 충격파력식을 사용하였다(Horikawa, 1991; Sawargi, 1995).

해양구조물 운송시 슬래밍 해석을 위해 사용했던 식을 적용하여 원기둥에 작용하는 충격파력을 다음의 식에 의해 계산할 수 있다(조, 1995).

$$F_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_s \cdot D \cdot u_{\max}^2 \quad (9)$$

여기서, u_{\max} : 최대 수평 물입자 속도

C_s : 슬래밍계수

D : circular cylinder diameter

C_s 값은 부재의 해수면과의 접촉시 이론적으로 최대값 π 를 가지며 침수단면의 증가에 따라 변한다. 보수적인 초기설계를 위해 C_s 값을 π 로 취할 수 있다.

3. 실험적 접근 방법

3.1 실험장치

본 실험은 한국해양연구소 선박해양공학 분소 해양기술연구부 소재로 있는 해양공학수조에서 행하였으며 크기는 소파장치 포함해서 길이 50m, 폭 30m, 깊이 3.5m이고 플랩 형식의 조파기를 사용하고 있다. 실험 모델은 외경 8.9cm, 두께 2.4mm, 길이 2m인 재질이 철인 중공축 실린더에 절재 Plate와 길이 6m의 τ 자 channel를 부착하여 모델을 제작하였다(대한조선학회, 1996; Dean, 1984; 이, 1985).

이를 위한 제한사항 및 고려사항은 다음과 같다.

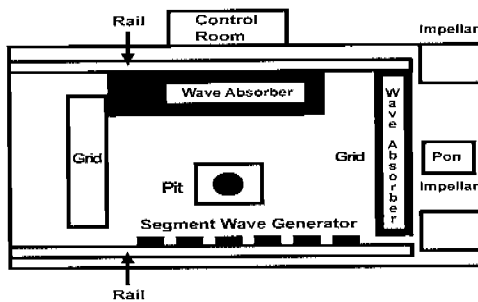


Fig. 3 General view of basin (Plan view)

1. 원형 실린더 부재의 직경에 걸리는 힘은 Morison's equation을 쓰므로 직경/파장 < 0.2 이어야 하므로 직경은 60cm 미만 이어야 한다.
2. 다음과 같이 여러 선급에서 통상적으로 제시하고 있는 해양 구조물의 원형부재의 Dimmension의 비를 만족해야 한다. 이는 일반적인 좌굴방지를 위한 제한 조건이므로, 실제 구조물에서는 필수적으로 요구되나 실험에서도 안전을 기하기 위해서 이 기준을 채택하였다.

$$\frac{t}{D} > \frac{1}{60} \quad (t: \text{두께}, D: \text{외경})$$

3.2 실험방법

Calibration 수행후 제작된 실험모델을 해양공학 수조 바닥에 고정하고, 파도가 진행해 오는 수직방향으로 스트레인 게이지를 부착하고 수밀처리를 한 후 파도를 모델에 가해지게 하였다

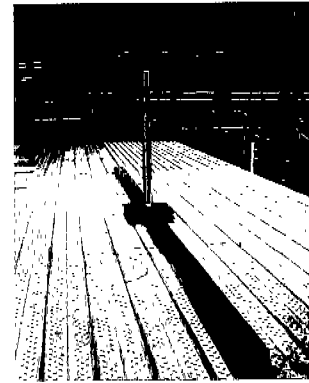


Photo 1 General view of testing model

다. 이 때 측정된 스트레인으로 항력과 관성력의 합인 전체 파력을 계산하고 이를 Morison's equation 및 Goda의 근사식에서 구한 이론치와 비교 하였다. Table 1에 보여진 제원의 파를 실험 모델에 작용시켰다. 파의 파고, 파장, 주기는 Airy (Linear) wave theory에 의해 정하였다(대한조선학회, 1996; 이, 1985).

4. 수치해석적 접근 방법

4.1. 유한요소모델

Fig. 4과 같이 2차원 수조바닥에 쇄파가 발생하도록 일정한 경사구배를 주고 그 경사면에 쇄파가 발생하도록 모델링 하였다. 빔용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 통해 모델링 및 수치해석을 통해 충격하중을 산정하고 이론식의 계산값과 비교하였다. 2차원 수조 바닥에 원기둥이 설치되는 것을 모델링 하므로 유체와 고체간의 상호작용 및 유체력을 구하는 네 쓰이는 2차원 유체요소인 Fluid79와 2차원 봉요소인 Beam3를 요소로 사용 하였다. 여기서 수조의 전체 가로 길이는 52m, 구배가 없는 곳의 깊이는 1.5m, 바닥구배는 각각 0, 1/10, 1/20, 1/30, 1/50으로 하고 원기둥이 수심 0.5m지점에 설치되는 것으로 모델링 하였다(ANSYS, Logan 1997).

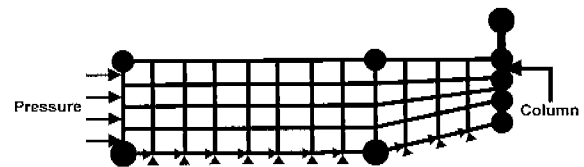


Fig. 4 Load & boundary condition on model

4.2 경계조건 및 하중조건

모델링된 수조가 길이(52m)에 비해 깊이(1.5m)가 매우 작으므로 파도 발생시 X방향 자유도가 클 것이므로 X방향 자유도 (UX)는 구속되지 않도록 하였고 Y방향 자유도는 0로 하였다. 수조의 유체와 원기둥의 접하는 절점에서는 유체의 X방향 자유도와 원기둥의 X방향 자유도를 같다고 하였고, 원기둥이 설치된 바닥 지점에서는 모든 자유도를 0으로 하였다. 수조 왼쪽면에 조화함수의 압력구배를 주어 파도가 발생하도록 하였다.

본 수치해석 및 이론계산에 적용된 Design Case는 Table 1과 같다(Heroshi; Logan, 1997).

Table 1 Design condition for test

	구배 1/50	구배 1/30	구배 1/20	구배 1/10
쇄파파고(m)	0.4	0.45	0.5	0.625
심해파장(m)	50	50	50	50
쇄파수심(m)	0.5	0.5	0.5	0.5
주기(sec)	5.66	5.66	5.66	5.66
부재직경(m)	1	1	1	1
파속 (m/sec)	2.2	2.2	2.2	2.2
U_{MAX} (m/scc)	2.66	3.00	3.33	4.16

5. 결과 및 고찰

5.1 실험과 이론적 방법 비교 결과

스트레인 측정지에 의해서 항력 및 관성력을 합한 파력을 구할 때 파력이 포물선으로 작용하므로 정수면 (still water level) 즉 수조바닥에서 1.5m지점에 집중하중이 작용한 것으로 가정해서 파력을 산정하였다.

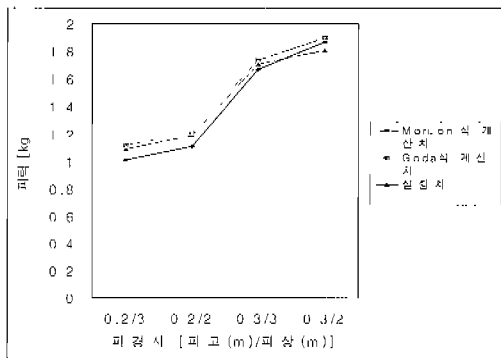


Fig. 5 Result of experiment

Fig. 5에서 보여진 제원의 파에 의해 원기둥에 걸린 파력은 파고가 20cm에서 30cm로 증가하고 파장이 3m에서 2m로 감소함에 따라 즉, 파경사도(파고/파장)가 커질수록 파력이 커졌다. 이론 및 실험치에서 동일한 파고에서 파장이 감소하였을 때 보다 동일한 파장에서 파고가 증가할 때 파력이 더 커졌다. 파장이 변함에 따라 주기와 파도의 속도가 변하게 되는데 관성력 (F_M)은 유체입자의 가속도에 비례하고 항력 (F_D)은 유체 입자의 속도의 제곱에 비례한다.

Morison 식이나 Goda의 식이나 다 같이 C_D 나 C_M 을 사용해야 하므로 이 값의 의미는 크다고 할 수 있다. C_D , C_M 의 값은 구조물의 단면형상에 따라 다르나, 원형 단면의 경우 일반

적으로 사용하는 선급의 추천값을 사용하게 된다. 실험에 의해서 얻어진 이번 경우는 파고가 비교적 작고 미소진폭파 이론을 적용하여 계산하는 경우와 잘 일치하고 있으나 C_D 와 C_M 과의 연계성이나 해상 상태가 위의 이론을 적용하기 어려운 경우에는 Morison 식이나 Goda 식을 이론치의 기준으로 삼는 것은 어려울 것이다. 정확한 해상 상태의 구현 아래 모형 실험을 통하여 파력을 구하는 것이 바람직하다고 사료된다. 그러나 본 실험에서는 일반적으로 사용되는 위의 식들이 실험치와 비교가 되는 정도를 파악 분석하여 보는데 의미가 있으며, 각 조를 이용하여 파력을 측정하는 과정을 정립하고 실험기법의 타당성을 입증하는 것에 의미가 있다고 생각된다. 예상했던 바와 같이 본 실험에서 실험치가 Morison's equation 및 Goda의 근사식에서 구해진 이론치와 일치함을 알 수 있었다. 이는 여러 가지 제약조건하에서 제한적이기는 하나 이론치와 실험치의 비교 분석 지침이 될 수 있다.

5.2 수치해석 결과 및 고찰

충격파력 계산을 위한 수치해석 결과는 몇 가지 제한되고 가정된 상황 아래에서 행해진 것이지만, 쇄파파력의 일차적인 수치계산 수행 과정을 제시하고 있다. 이론치와의 비교 검토를 위해서 사용된 식(9)에 의한 충격하중의 값은, 쇄파파력의 각 가지 다양한 계산 방법 중 하나의 모델로서 채택되었으며 이의 이용은 정성적 성향이 강하지만 수용해서 사용할 수 있다고 생각된다.

ANSYS를 이용하여 구한 쇄파파력에 대한 수치해석 결과는 Fig. 7에 나타나 있으며 이론치와 일치함을 볼 수 있었다. 바닥 구배가 있는 실험실의 수조에서 규칙파를 일으켜 경사면을 진행시키면, 전수변형에 의해 파고가 변화하고 어떤 수심에서 부서지면서 쇄파가 발생할 때 파가 부서지는 지점은 거의 일정하다. 파가 부서지기 시작하는 지점을 쇄파점, 그 장소의 수심을 쇄파수심, 그 곳의 파고를 쇄파고라 하면 이것들은 Fig. 8에서 보여진 것처럼 일정한 양상을 보인다. 본 수치해석에서는 Fig. 8에서 보여진 Goda의 실험결과에서 쇄파고를 구하고 이에 따른 계산을 수행하였다. 바닥구배가 급해질수록 일정 수심에서의 쇄파고가 커짐을 알 수 있는데 바닥구배가 급해질수록 쇄파에 의한 파력이 커진다고 볼 수 있다. Fig. 5에서 보여진 것처럼 경사구배를 각각 1/10, 1/20, 1/30, 1/50으로 하여 수치해석하였을 때 경사구배가 급할수록 충격하중이 커졌으므로 이는 Fig. 8와 같은 경향을 보인다.

식(1)을 이용하여 계산된 이론적 충격파력의 크기는 다음과 같은 예로 그 중요성을 인식할 수 있다. 구배가 1/20인 경우에 대해서 식(1)에 의해서 구분되어지는 F_D 와 F_M , F_I 를 계산하여 그 크기를 도표로 나타내 보면 다음과 같다.

이 경우 가장 중요시되고, 큰 값으로 나타나는 것이 충격파이므로 충격쇄파력값의 산정 과정이 실질적으로 구조물 설계 시 필수적으로 고려되어야 할 것이다.

충격쇄파력이 포함된 충격하중의 이론치와 수치해석값이 이 경우 근사하게 일치되며 결론적으로 쇄파에 의한 충격하중 산정시 충격쇄파력값의 고려가 필수적인 것으로 판단된다.

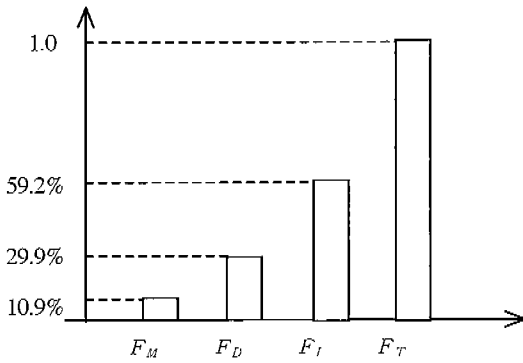


Fig. 6 Percentage of each force

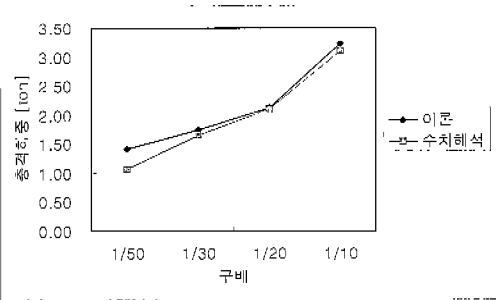


Fig. 7 Result of numerical analysis

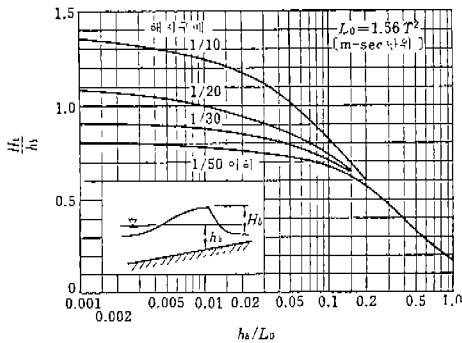


Fig. 8 Breaking wave height at regular wave

6. 결 론

본 논문에서는 해양구조물의 설계, 해석시 필수적으로 고려해야 하는 파랑하중을 여러 가지 기법으로 산정하는 기법을 정립하였다. 또한 이를 근거로 충격하중을 산정하는 방법이 제시되고 비교 검토되었다.

실험적 방법의 예시로 이러한 파력 산정을 위한 하나의 기준과 방법을 제시할 수 있었으며 이를 통하여 해양구조물에 작용하는 파력을 일차적으로 검증할 수 있었다.

실험과 수치해석을 수행하여 실험적인 방법에서는 쇄파가 발생하지 않는 일반적인 파랑하중값을 이론치와 비교하였다. 수치해석적 방법에서는 충격하중을 구하여 이론치와 비교하였

고 충격하중 산정시 충격쇄파력을 고려해야 하는 것으로 판단되었다. 실험 및 수치해석적 기법 모두 이론과 일치함을 볼 수 있다.

본 논문에서 제시된 기법으로 해양구조물에 작용하는 충격하중을 포함한 파랑하중을 일차적으로 산정할 수 있으며 이는 해양구조물 초기설계시 유용하게 적용될 수 있겠다. 또한 해양공학구조물 이용하여 해양구조물에 작용하는 파랑하중을 산정하는 실험을 통한 해양구조물에 작용하는 파랑 산정 기법에 대한 실험적 지침을 제시하였다.

후 기

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

대한조선학회(1996). "해양공학개론", 동명사.
 윤재준(1996). "쇄파대내의 해양구조물 설계인자의 영향 분석", 홍익대학교 대학원 석사학위 논문.
 이재신(1985). "해양구조물 설계개요", 광문출판사.
 전인식, 심재설, 이홍직. "경사면 쇄파발생에 대한 경계요소법의 적용", 대한토목학회 논문집, 제18권 제2집 3호.
 조규남(1995). "쇄파 파력을 받는 원형 해양 구조부재의 설계", 한국해양공학회 '95년도 춘계 학술대회.
 Dean, R. G., Dalrymple, R. A.(1984). "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", Prentice-Hall, Inc.
 Faltinsen, O., et al., "Water Impact Loads and Dynamic Response of Horizontal Circular Cylinders in Offshore Structures", OTC 2741.
 Goda, Yohima(1985). "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo Press.
 Kobayashi Heroshi, "해양시설의 계획과 설계".
 Horikawa, K.(1991). "해안공학 신편", 김남형역, 청문각.
 Kaplan, P., Silbert, M. N., "Impact Forces on Platform Horizontal Members in the Splash Zone", OTC 2498.
 Von Karman, T.(1929). "The Impact of Sea Plane Floats during Landing", N.A.C.A.
 Daryl L. Logan(1997). "Logan의 유한요소법 첫걸음 ANSYS 에 제집".
 Sawaragi, T.(1995). "Coastal Engineering Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions", Elsevier.
 合田良寛, 原中祐人(1996). "직립원기둥에 작용하는 충격쇄파력에 관한 연구", 일본항만기술연구소 보고서, 제5권 6호.

2000년 1월 3일 원고 접수
 2000년 2월 18일 수정본 채택