

## 수치시뮬레이션을 이용한 사석잠제의 거동특성 검토 Analysis of Behavior Characteristics of Submerged Breakwater by Numerical Simulation

박영석<sup>1</sup>, 윤성진<sup>2</sup>, 김규한<sup>3</sup>, 편종근<sup>4</sup>

Young-Suk Park<sup>1</sup>, Seong-Jin Yoon<sup>2</sup>, Kyu-Han Kim<sup>3</sup> and Chong-Kun Pyun<sup>4</sup>

### 1. 서 론

해안역 시설의 안전을 위해 설치된 콘크리트제의 해안구조물인 제방이나 호안, 소파제 등은 수면위로 돌출한 구조물로서 아름다운 해안공간에서 경관을 훼손하는 중요한 원인의 한가지로서 비판을 받고 있다. 이에 따라 해안을 이전의 자연적인 해변환경으로 되돌리고, 해변을 친숙하게 만들기 위한 노력이 이루어지고 있으며, 환경, 경관, 이용, 친수 등 다양한 측면을 고려할 수 있는 해안정비가 요구되고 있다. 따라서, 종래의 해안방호 기능에 추가적으로 자연환경과 이용자 측면을 고려한 해안정비가 요구되고 있으며, 이에 따라 기존의 선적인 방호방식보다는 양빈공법과 인공리프를 조합한 Perched Beach의 형태 또는 완경사호안을 조합하는 등의 면적방호방식이 향후 해안정비의 기본이 되고 있다.

인공리프는 연안역에 설치되는 소파구조물이며, 고파랑 내습 시의 처오름높이와 월파랑의 저감, 또는 해안선의 장기적인 안정을 도모하는 것을 목적으로 하여 설치되는 해안보전시설로서, 최근 채택되어 시공되는 경우가 증가하고 있다. 인공리프는 자연의 산호초군이 잠수형 구조임에도 불구하고 넓게 분포하기 때문에 파랑감쇠 효과를 발생시키는 기능을 모방한 구조물이며, 천단상에서의 강제쇄파에 의한 파랑감쇠 효과를 얻

을 수 있다. 따라서, 인공리프는 천단폭이 상당히 넓은 잠제(광폭잠제)로 정의하고 있으며, 물속에 잠겨있는 잠수형 구조물이기 때문에 경관을 훼손하지 않고 해수교환성도 우수하여 양호한 어장으로서도 기대할 수 있다.

이러한 해안구조물의 설계에서는 통상 설계외력에 대한 제체의 안정성의 검토만을 수행하고 그 이상의 외력에 대한 제체의 변형 및 변형에 따른 수리특성의 변화는 검토하지 않는 것이 일반적이다. 그러나, 설계외력 이상의 파랑 특히, 장주기성 고파랑이 내습할 가능성이 존재하고 이러한 경우의 제체변형 및 수리기능의 변화를 파악해두는 것은 설계 및 유지·보수에 있어서 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 소파구조물인 인공리프를 대상으로 하여 각 파랑제원에 따른 인공리프 제체의 거동을 파악함과 동시에 수치시뮬레이션에 의해 그 거동을 재현 및 검증하여, 향후 인공리프 설계 시 수치시뮬레이션 결과를 이용할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다.

### 2. 수치시뮬레이션

#### 2.1 DEM의 개요

인공리프(잠제)의 안정성 검토방법으로서 천단면이 균일한 질량의 사석구조 또는 천단면이 이

1 (주)한동E&C 대표이사  
2 관동대학교 첨단해양공간연구센터 선임연구원  
3 관동대학교 토목공학과 교수  
4 명지대학교 토목환경공학과 교수

형소과블력 구조의 경우에는 구조물의 중요도에 따라서 다소의 변형을 허용한 설계도 가능해지고 있다. 그러나, 슬리트케이스 등의 단일구조물이 아닌 사석의 집합체로서 구조물이 형성되는 경우, 외력에 의해 표층의 피복재에 거동, 탈락 등의 피해가 발생하기 시작되면 구조물 자체에 커다란 영향을 미칠 수 있기 때문에 단일개체의 거동Mechanism을 파악할 필요가 있다.

Cundall-Strack(1979)에 의해 제안된 개별요소법은 사석방파제나 피복석을 이용한 인공리프의 단면변형예측의 방법이며, 개개의 요소(사석)가 운동방정식을 만족하고 요소간의 힘의 전달이 작용-반작용의 법칙에 따르는 것을 조건으로서 개개 요소의 운동을 추적하여 요소의 집합체에 대한 전체적인 동역학적 거동을 수치적으로 해석할 수 있는 방법이다.

개별요소법(DEM, Discrete Element Method)은 암반이나 지반재료 등의 불연속체 해석방법으로서, 다수의 독립된 개별요소(사석 또는 블럭)를 이용하여 개별요소 간에 서로 충돌하면서 발생하는 접촉력과 마찰력을 서로 작용시켜 개개의 요소가 이동하는 변화량을 예측할 수 있게 된다. 이와 같이 요소로부터 임의의 재료가 힘을 받아서 크게 변형될 경우 그 변형은 고체요소 자체의 변형이 아니라, 고체요소 간의 상대운동의 결과로서 개개요소의 이동이 발생하게 된다. 따라서, 유한요소법 등의 연속체 해석방법에서는 해석이 곤란한 파괴·분리·재접촉 문제 등을 개별요소법에서는 간단한 알고리즘으로 해석할 수 있는 특징이라고 할 수 있다.

## 2.2 기초방정식

식(1)~(3)에 이동 및 회전에 대한 운동방정식을 나타내었으며, 각각의 요소(사석)는 이하의 운동방정식을 만족하여야 한다.

$$(m_i + m_i')\dot{u}_{pi} = \sum_j [F_{xi}]_j + [f_{xi}] \quad (1)$$

$$(m_i + m_i')\dot{w}_{pi} = \sum_j [F_{zi}]_j + [f_{zi}] - V_i(\rho_s - \rho)g \quad (2)$$

$$(I_i + I_i')\dot{\omega}_{pi} = \sum_j [M_i]_j \quad (3)$$

여기서,  $m_i$ 는 요소 $i$ 의 질량,  $u_{pi}$ ,  $w_{pi}$ ,  $\omega_{pi}$ 는 각각 요소 $i$ 의 속도의  $x$ (수평),  $z$ (연직)방향성분 및 각속도,  $V_i$ 는 요소 $i$ 의 체적,  $g$ 는 중력가속

도,  $\rho_s$ ,  $\rho$ 는 사석 및 물의 밀도,  $m_i'$ ,  $I_i'$ 는 부가 질량 및 부가관성모멘트,  $\sum_j [F_{xi}]_j$ ,  $\sum_j [F_{zi}]_j$ ,  $\sum_j [M_i]_j$ 는 각각 요소 $i$ 가 접촉하고 있는 요소로부터 발생하는  $x$ ,  $z$ 방향의 힘의 총합 및 모멘트의 총합,  $[f_{xi}]$ ,  $[f_{zi}]$ 는 요소 $i$ 에 작용하는 파력의  $x$ ,  $z$ 방향성분을 나타낸다.

본 계산에서는 요소를 원형으로 가정하고 Fig. 1에 나타내는 바와 같은 좌표계를 사용하였다. 2개의 요소가 충돌하는 경우에 사석간의 상호작용은 접촉점간에 삽입되었다고 가정한 탄성용수철(용수철정수  $K_n$ )와 점성의 완충장치(점성감쇠계수  $\eta_m$ )로 나타낼 수 있다.

## 2.3 접촉시의 상대변위와 작용력

DEM 계산에서 요소로서 사용한 형상은 계산조건에 편의상 원(구체)으로 가정하였다. 좌표계는 Fig. 1에 나타내는 바와 같고, 요소 $i$ (반경 $r_i$ )와 요소 $j$ (반경 $r_j$ )의 접촉판정은 식(4)와 같다.

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } R_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

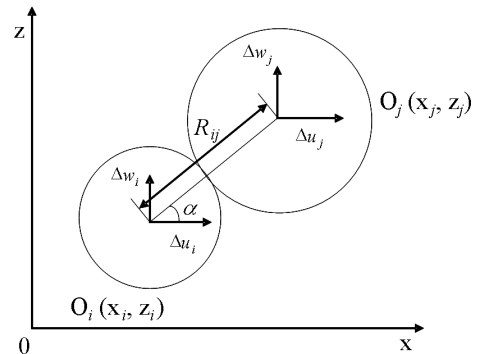


Fig. 1. Contact Condition

또한, 공통법선의 축과 이루는 각(반시계 방향을 정)을  $\alpha_{ij}$ 로 하고, 접촉중의  $\Delta t$ 간의 법선방향  $\Delta u_n$ (접근을 정) 및 접선방향  $\Delta u_s$ (반시계 방향을 정)의 상대변위 증분은 식(5), 식(6)에 나타내었다.

$$\Delta u_n = (\Delta u_i - \Delta u_j)\cos\alpha_{ij} + (\Delta w_i - \Delta w_j)\sin\alpha_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta u_s = -(\Delta u_i - \Delta u_j)\sin\alpha_{ij} + (\Delta w_i - \Delta w_j)\cos\alpha_{ij} + (r_i\Delta\varphi_i + r_j\Delta\varphi_j) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{ij} &= -(z_i - z_j) / R_{ij} \\ \cos \alpha_{ij} &= -(x_i - x_j) / R_{ij} \end{aligned}$$

법선방향의 작용력은 Fig. 2(a)에 나타내는 바와 같이 시간 Step  $\Delta t$  간의 법선방향의 상대변위증분  $\Delta u_n$ 에 비례한 응력증분(탄성용수철에 의한 항력)  $\Delta e_n$ 을 발생시킨 탄성작용(용수철정수  $K_n$ )과, 상대변위속도  $\Delta u_n / \Delta t$ 에 비례한 응력(점성의 완충체에 의한 항력)  $\Delta d_n$ 을 발생시킨 점성완충장치(점성감쇠계수  $\eta_n$ )의 병렬배치를 가정한다.

$$\Delta e_n = K_n \Delta u_n \quad (7)$$

$$\Delta d_n = \eta_n \Delta u_n / \Delta t \quad (8)$$

시각  $t$ 에 있어서 법선방향의 탄성항력  $[e_n]_t$ 와 점성항력  $[d_n]_t$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + \Delta e_n \quad (9)$$

$$[d_n]_t = \Delta d_n \quad (10)$$

따라서, 시각  $t$ 에 있어서의 두 요소간의 법선방향 압축력은 이하와 같다.

$$\begin{aligned} [f_n]_t &= [e_n]_t + [d_n]_t \\ &= ([e_n]_{t-\Delta t} + \Delta e_n) + \Delta d_n \end{aligned} \quad (11)$$

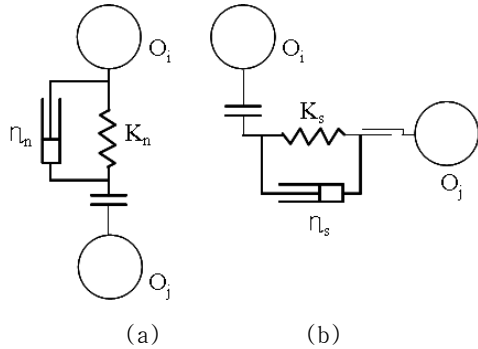


Fig. 2. Image of Action Force

접선방향의 작용력에 대해서도 Fig. 2(b)에 나타내는 바와 같이 전단항력에 해당되는 탄성용수철(용수철정수  $K_s$ )과 점성완충장치(점성감쇠계수  $\eta_s$ )의 병렬배치를 가정한다. 탄성항력증분  $\Delta e_s$ 와 점성항력증분  $\Delta d_s$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta e_s = K_s \Delta u_s \quad (12)$$

$$\Delta d_s = \eta_s \Delta u_s / \Delta t \quad (13)$$

시각  $t$ 에 있어서의 접선방향의 탄성항력  $[e_s]_t$ 와 점성항력  $[d_s]_t$ (요소  $i$ 에 관하여 시계방향을 정으로 한다)은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[e_s]_t = [e_s]_{t-\Delta t} + \Delta e_s \quad (14)$$

$$[d_s]_t = \Delta d_s \quad (15)$$

따라서, 시각  $t$ 에 있어서의 두 요소간의 접선방향 전단력  $[f_s]_t$ 은 이하와 같다.

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \quad (16)$$

## 2.4 계산조건

입자 충돌 시의 입자간 작용과력의 산정에 필요하게 되는 용수철의 탄성계수, 점성의 완충장치의 점성감쇠계수 및 계산시간 간격은 안정적인 계산이 수행될 수 있도록 Table 1에 나타낸 값을 사용하였다.

Table 1. Values of Constants

|         |        |                                 |
|---------|--------|---------------------------------|
| 탄성계수    | (법선방향) | $K_n = 6.86 \times 10^5$        |
|         | (접선방향) | $K_s = 3.92 \times 10^3$        |
| 점성감쇠계수  | (법선방향) | $\eta_n = 5.51 \times 10^3$     |
|         | (접선방향) | $\eta_s = 1.0 \times 10^1$      |
| 마찰계수    |        | $\mu = 0.6$                     |
| 계산시간 간격 |        | $\Delta t = 5.0 \times 10^{-6}$ |

또한, 과력산정에 이용한 Morison식 중의 항력계수  $C_D$  및 관성력계수  $C_M$ 은 사석요소(원요소)에 작용하는 과력을 고려하여 항력계수  $C_D=0.7$ , 관성력계수  $C_M=1.5$ 로 하였다.

Fig. 3에 인공리프 제체의 제원을 나타내었으며, 요소(사석)의 입경은 1.5~2.0cm의 원형으로 구성하였다.

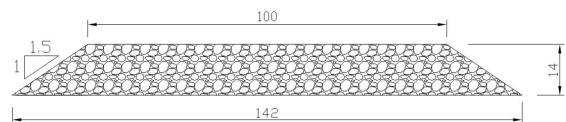


Fig. 3. Profile of Submerged Breakwater

또한, 천단수심  $R=2\text{cm}$ 이고, 파고  $H=6\sim 10\text{cm}$ , 주

기  $T=1.6\sim 2.9\text{sec}$ 의 규칙파로 하였다.

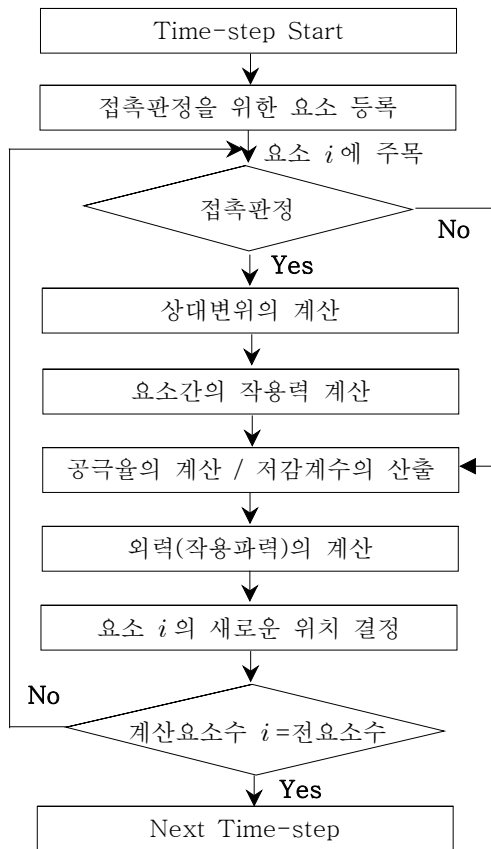


Fig. 4. Flow-chart of DEM

### 2.5 계산결과

DEM 계산 시 외력으로서 작용하는 파력의 산정에는 Morison식을 이용하였으며, 이 때 필요한 유속값은 별도의 CADMAS-SURF 계산결과를 이용하였다.

Fig. 5에 수치시물레이션 결과의 일례(파고 8.0cm)를 나타내었으며, 초기단면과 300파 작용 후의 단면을 나타내고 있다.

결과를 보면, 제체의 심해측 사면상단부 및 천단상에서 변형이 크게 발생하면서 정수면( $z/h=0$ )으로 돌출되는 현상을 보이고 있다. 또한, 단주기( $T=1.6\text{sec}$ )의 경우에 비해 장주기( $T=2.9\text{sec}$ )의 경우에 피해가 더욱 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

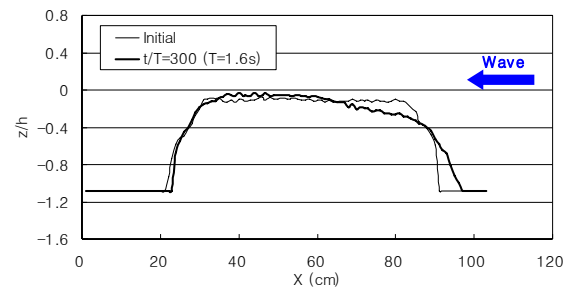
### 3. 결 론

개별요소법(DEM)을 이용하여 일반적인 주기와 장주기파에 의한 인공리프의 파괴형태를 비교·검토한 결과, 일반주기에서는 심해측의 사면상단부 주변에만 파괴가 발생하지만, 장주기파에 의해서

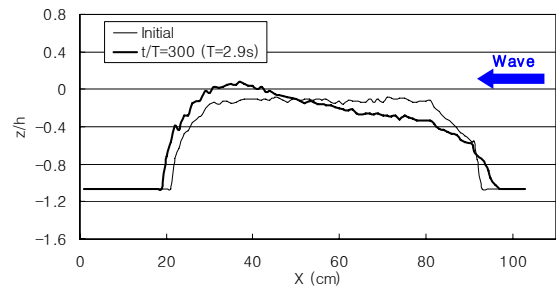
는 더욱 넓은 범위의 파괴가 발생하는 것을 확인하였다.

DEM을 이용한 수치시물레이션에 의해 사석구조물의 파괴형태를 비교적 간편하게 예측하여 파괴시 보강여부 및 위험단면의 보강위치를 결정하는데 유용하게 사용할 수 있으리라 사료된다.

현재, 2차원 단면수리모형실험을 수행하고 있으며, 이 결과와의 비교·검토를 통한 수치시물레이션 결과의 검증작업을 수행중에 있다.



(a)  $T=1.6\text{sec}$  ( $t/T=300$ )



(b)  $T=2.9\text{sec}$  ( $t/T=300$ )

Fig. 5. Results of Numerical Simulation

### 감사의 글

본 연구의 일부는 RIC 사업의 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29, No. 1, pp. 47-65.
- Araki, S., Fujiwara, Y., Miyazaki, T. and Deguchi, I. (2001). Numerical Calculation on Deformation of Submerged Breakwaters with Discrete Element Method, *Proceedings of the 1st Asian and Pacific Coastal Engineering Conference*, Vol.2, pp. 630-639.