

# 다면체 사석배열 해안구조물에 대한 수치해석모델의 모델링 기법 검증

최웅식\* · 김기동\*\* · 한동석\*\*\*

Choi, Woong-Sik\*, Kim, Kee-Dong\*\*, Han, Tong-Seok\*\*\*

## Validating Numerical Analysis Model Modeling Method by Polyhedral Rubble Mound Structure Arrays

### ABSTRACT

Hydraulic experiments are performed in order to verify the swash effect of seashore structures installed to prevent scouring. However, a great deal of investment and time are required for producing the test apparatus and seashore structure used to perform the hydraulic experiment. The swash effect can be predicted, however, by using a numerical model and validation can be done based on comparisons of the numerical model and hydraulic experiment analysis results, thereby saving the cost and time required for producing the test apparatus and seashore structure. Taking a polyhedral rubble mound structure as the subject, this study performed a comparative analysis of wave run-up and run-down height of the numerical model interpretative results and the hydraulic experiment results, and validated the interpretative simulation wave test modeling technique. The study also predicted the swash effect by using the numerical interpretation approach method, whereby the volume ratio and friction area of the rubble mound were varied for different results.

**Key words** : Hydraulic experiment, Numerical model, Polyhedral rubble mound structure, Wave run-up, Wave run-down, Scour

### 초록

세굴방지를 위하여 설치하는 해안구조물의 쇄파효과를 검증하기 위하여 수리조파실험이 실시된다. 하지만 수리조파실험을 실시하기 위해서 사용되는 실험 장치와 해안구조물의 제작에 많은 비용과 시간이 소요된다. 수치해석모델과 수리조파실험의 해석결과를 비교하여 검증하면, 수치모델을 활용하여 쇄파효과를 예측할 수 있고 실험 장치와 해안구조물 제작에 소요되는 비용과 시간을 절약할 수 있다. 본 연구에서는 다면체 사석 구조물을 대상으로 수치해석결과와 수리조파실험 결과의 차이를 및 처내림 높이를 비교분석을 수행하였고 해석적 모의 조파실험 모델링 기법을 검증하였다. 또한, 사용한 수치해석 접근 방법을 활용하여 사석의 부피비와 마찰면적을 변화시켜 쇄파효과를 예측하였다.

**검색어** : 수리조파실험, 수치해석모델, 다면체 사석 구조물, 처오름, 처내림, 세굴

## 1. 서론

심해에서 발생하여 해안에 도달하는 파랑은 해안에 가까워질수록 수심이 얕아져 해안 사면과의 마찰을 일으킨다. 이 때 항만구조물 및 연안에 건설된 해안구조물과 접촉하면서 해수의 처오름 및 처내림이 발생하고 해안 사면과 해수의 마찰이 계속되어 기초지반의 유실이 발생한다(Sumer et al., 2000). 발생한 해안 사면의 지속적인 유실은 해안 저면까지 영향을 주어 세굴현상이 발생하고 연안구조물도 파괴될 수 있다. 따라서 세굴현상의 감소를 위하여 돌방태, 사석 등의 해안구조물을 설치하고 직립형 해안구조물을 경사형 해안구조물로

\* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (ws-choi@yonsei.ac.kr)

\*\* 정희원 · 국립공주대학교 건설환경공학부 교수 (kkkim@kongju.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 부교수 (Corresponding Author · Yonsei University · tshan@yonsei.ac.kr)

Received August 14, 2013/ revised October 27, 2013/ accepted February 9, 2014

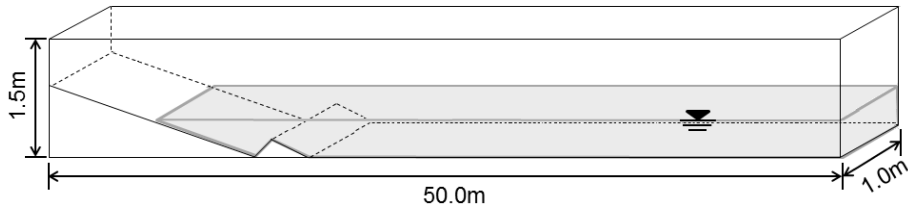
설계하는 등 다양한 방법으로 구조물을 설치한다. 세굴현상의 발생을 감소시키기 위해 설치하는 다양한 해안구조물의 효과를 검증하기 위해서는 일반적으로 수리조파실험을 실시한다. 하지만, 수리조파실험을 위하여 조파실험 장치와 해안구조물의 제작에 많은 비용과 시간이 소요된다. 검증된 수치해석모델을 사용하여 해석을 실시하고 결과를 분석하면 수리조파실험에 소요되는 비용과 시간을 절약할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 해안구조물 중 사석형 해안구조물을 대상으로 수치해석모델의 해석 결과와 수리모형 조파실험 결과를 비교분석하여 검증하고 쇄파효과 경향을 살펴보았다.

## 2. 수치모형실험 장치 모델링

수치모형 검증에 이용된 수리모형 조파실험은 주식회사 한길 부설연구소(충청남도 부여 소재)의 조파실험 수조에서 실시되었다.

조파실험 수조 실험 장치는 Fig. 1(a)와 같고, 폭 1.0m, 높이 1.5m, 길이 50.0m이다. 사석형 해안 구조물을 올려놓기 위하여 사용된 실험 경사대는 Fig. 2와 같이 폭 1.0m, 높이 1.0m, 길이 2.0m이다. 사석이 흘러내리지 않도록 폭 1.0m, 높이 0.17m, 길이 0.4m의 지지대가 설치되었다.

수치조파실험 해석은 상용 유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA (ls971s R5.0, LSTC)를 사용해서 FSI (Fluid-Structure Interaction) 방법으로 해석하였다. 조파실험 수조 모델링은 요소(Element) 및 절점(Node) 개수가 많아져 해석시간이 많이 소요되는 것을 방지하기 위해서 해석모델의 크기를 조절하였다. 전체 수치모형을 Fig. 3과 같이 폭 1.0m, 높이 1.5m는 유지하고, 길이를 10m로 축소시켜 모델링하였다. 유체구간을 공기와 물로 나누어 2개의 층으로 표현하기 위해서 위층은 폭 1.0m, 높이 1.0m, 길이 10m 크기의 공기층으로 모델링하였고, 아래층은 폭 1.0m, 높이 0.5m, 길이 10m



(a) Schematic of Experiment Water Tank and Slide (Not to scale)



(b) Front View of Hydraulic Experiment Water Tank

Fig. 1. Hydraulic Experiment Water Tank

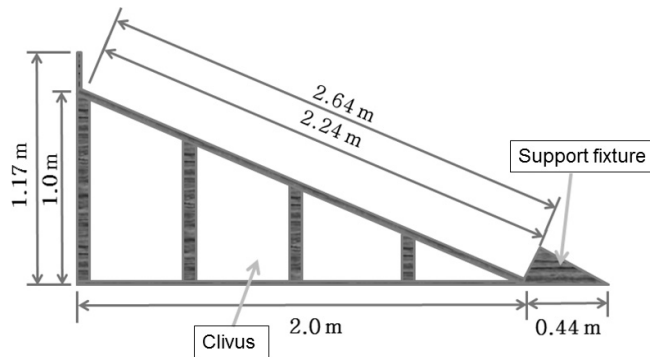


Fig. 2. Schematic of Experiment Slide

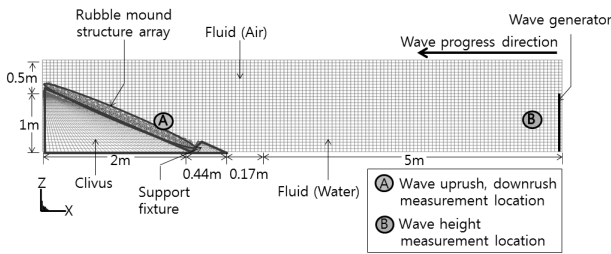


Fig. 3. Numerical Experiment Model

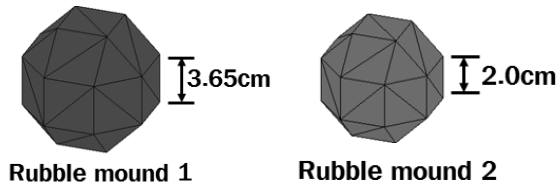
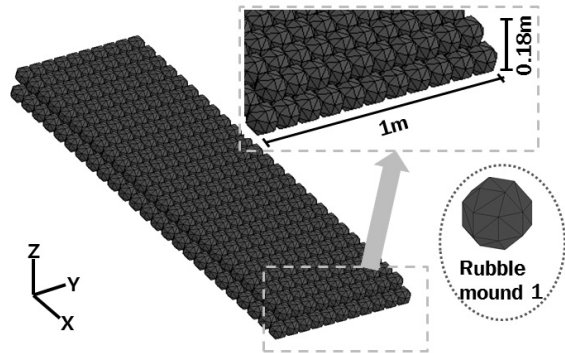


Fig. 4. Polyhedral Rubble Mound Structure Models

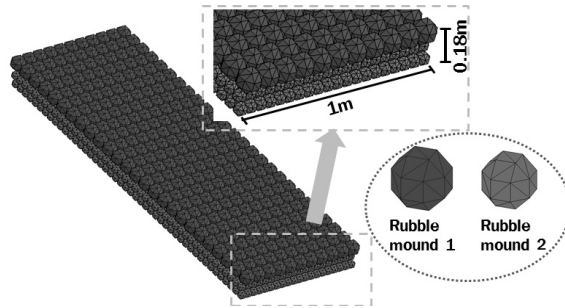
크기의 물 층으로 모델링 하였다. 사석형 해안구조물을 올려놓을 수 있도록 프리즘 형태를 가진 폭 1.0m, 높이 1.0m, 길이 2m 크기의 실험 경사대와 사석이 흘러내리지 않도록 지지하기 위하여 만든 폭 1.0m, 높이 0.17m, 길이 0.44m 크기의 지지대를 모델링 하였다. 파도를 생성하기 위하여 폭 1.0m, 높이 1.0m 크기의 판을 모델링하여 수평 변위를 주어 파도를 생성할 수 있도록 하였다. 파고는 높이에 따라 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm로 생성하였고, 해석에 소요되는 시간을 고려하여 8초 동안 해석을 실시하였다.

사석은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 실제 실험에 사용한 사석과 같도록, 크기가 다른 다면체의 형상으로 모델링하였다. 2 종류의 사석 크기는 각각 한 변의 길이가 3.65cm, 2.0cm이며, 실제 수리모형 조파실험에서 사용된 사석형상과 같도록 모든 변의 길이가 동일한 26면체 형상으로 모델링하였다.

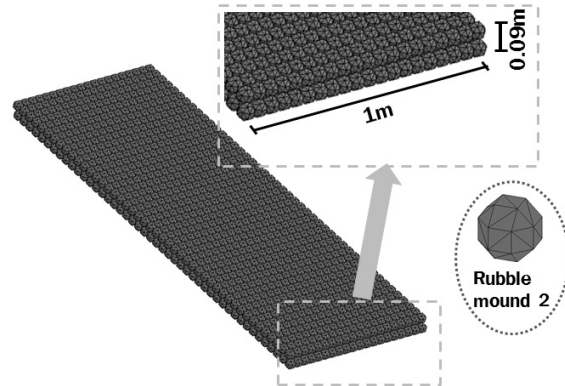
사석 배열은 2종류의 사석을 사용하여 3가지 사석배열(사석배열 1형, 2형, 3형)로 모델링하였다. Fig. 5(a)와 같이 사석배열 1형은 1층에 한 변의 길이가 3.65cm인 사석을 폭 방향으로 11개, 길이 방향으로 26개를 배열하였으며, 2층에 폭 방향으로 10개, 길이방향으로 26개를 배열하여 총 546개의 사석을 모델링 하였다. 사석배열 2형은 Fig. 5(b)와 같이 1층과 2층에 한 변의 길이가 2.0cm인 사석을 동일하게 폭 방향으로 10개, 길이방향으로 46개를 배열하였고, 3층에 한 변의 길이가 3.65cm인 사석을 폭 방향으로 11개, 길이 방향으로 27개를 배열하여 총 2,137개의 사석을 모델링 하였다. 사석배열 3형은 Fig. 5(c)와 같이 한 변의 길이가 2.0cm인 사석을 1층에 폭 방향으로 20개, 길이방향으로 46개를 배열하였고, 2층에 같은 사석을 폭 방향으로 19개, 길이 방향으로 46개를 배열하여 총 1,794개의 사석을 모델링 하였다.



(a) Rubble Mound Structure Array 1



(b) Rubble Mound Structure Array 2



(c) Rubble Mound Structure Array 3

Fig. 5. Rubble Mound Structure Array Models

사석배열 1형과 2형은 수치해석 결과와 수리조파실험 결과를 비교분석하고 검증하기 위하여 모델링 하였으며, 사석배열 3형은 단위 면적당 마찰면적을 크게 하고, 부피를 적게 하였을 경우의 쇄파효과를 예측하기 위하여 모델링 하였다. 실제 수조의 길이에 비하여 20% 길이를 갖도록 모델링을 하였기 때문에 조파장치에 의해 생성된 파도가 사석에 부딪힌 후, 반사파가 해석 결과에 영향을 주지 않도록 시간을 조절하여 해석시간을 8초로 설정하였다. 해석 모델의 총 Element 개수는 Solid Element 207,404개, Shell

Element 400개이다. 유체는 5cm 크기의 8 Node Brick Element를 사용하였고, 사석은 지름 8.8cm와 4.8cm 크기의 4 Node Tetrahedron Linear Element를 사용하였으며, 조파장치는 5cm 크기의 4 Node Shell Element를 사용하였다.

### 3. 상태방정식과 경계조건

해수 및 공기를 모델링하기 위하여 밀도( $\rho$ )와 유체의 압력( $p$ )간의 관계를 규정하는 상태방정식을 사용하였다. 이 상태방정식은 실험에 의한 선형 다항식이며, 체적 매개변수  $\mu$ 와 내부에너지  $E$ 를 이용하여 표현된다(Kim, 2007; Kim and Shin, 2008; Kang et al., 2012).

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2)\rho_0E \quad (\mu > 0) \quad (1)$$

$$p = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu)\rho_0E \quad (\mu < 0) \quad (2)$$

여기서  $\mu = (\rho - \rho_0)/\rho_0$ 이며,  $\rho_0$ 는 초기밀도,  $\rho$ 는 현재밀도를 나타내고,  $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$ 는 모델링 매개변수이다. Eq. (1)은 압축된 상태의 유체(해수)에 적용하는 식이고, Eq. (2)는 확장된 상태의 유체(공기)에 적용하는 식이다. 각 매개변수의 값은 Masahiko et al.(2011)의 연구에서 제시된 값을 사용하였다. 해수의 경우 해석에 사용한 각 매개변수의 값은  $a_1 = 2.306 \times 10^9 Pa$ ,  $a_2 = 8.432 \times 10^9 Pa$ ,  $a_3 = 8.014 \times 10^9 Pa$ ,  $b_0 = 0.4934 kg/m^3$ ,  $b_1 = 1.3937$ ,  $b_2 = 0$ 이고, 초기 내부 에너지를  $197.74 J/kg$ , 초기 밀도를 상온(20°C)에서의 밀도인  $1025 kg/m^3$ 로 설정하였다. 공기의 경우 사용한 각 매개변수의 값은  $a_1 = a_2 = a_3 = b_2 = 0$ 이고,  $b_0 = b_1 = 0.403$ , 초기 밀도를 상온(20°C)에서의 밀도인  $1025 kg/m^3$ 로 설정하였다. 유체가 수조 내부에서 외부로 유출되지 않도록 하기 위해서 각 벽면에 대하여 법선방향으로 유속을 0으로 고정하여 경계조건을 설정하였다.

파도를 생성하기 위해서 판을 생성한 후, Boundary Prescribed Motion Rigid 옵션을 사용하여 수평 변위를 주었다. 판이 1초 동안 이동하는 거리를 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m로 증가시켜 파고가 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm로 높아지도록 조절하였다. 유체가 공기와 물로 구성되어 있으며 사석 및 경사대가 유체 안에 존재하기 때문에 ALE Multi-Material Group (AMMG) 옵션을 사용하여 유체와 구조물간의 경계를 정의하였다. AMMG 옵션은 한 요소 내에 두 개 이상의 물질이 존재할 경우 물질 간의 경계를 설정하기 위하여 사용하는 옵션이다. 유체가 사석 및 경사대를 통과하지 않도록 하기 위하여 Slavik (2009)의 연구를 참조하여 Constrained Lagrange in Solid (CLS) 옵션을 사용하였다. CLS 옵션

을 사용할 경우 구조물의 변형 및 유체의 통과를 고려하지 않아 해석시간이 단축되는 장점이 있다. 총 해석시간은 8초로 설정하였으며, 해석 모델에 따라 소요된 해석시간은 20-60시간이 요구되었다. 기타 모델링 매개변수는 LS-DYNA에서 제공하는 기본 값을 사용하였다.

### 4. 수치모형 해석모델 검증 및 결과 분석

#### 4.1 해석적 수리조파실험 모델링 검증

세굴현상에 영향을 미치는 요소에는 유체의 성질, 해안 구조물의 형상, 파랑의 형태, 유체의 흐름, 처오름 및 처내림 높이 등이 있다. 본 연구에서는 유체의 성질, 파랑의 형태 등을 동일하게 유지하고 사석 구조물의 배열과 파고를 변형시켜 파랑이 평균 처오름 및 처내림 높이에 미치는 영향을 살펴보았다. 수리모형실험과 수치해석 결과의 비교를 위하여 실제 실험에서 측정된 위치와 같도록 높이 0.5m, 길이방향 1m 위치에서 처오름 및 처내림 높이를 측정할 위치를 선정하였고, 파고를 확인하기 위하여 파도를 생성하고 판의 1m 앞, 높이 0.5m 위치에서 파도의 높이를 확인하였다.

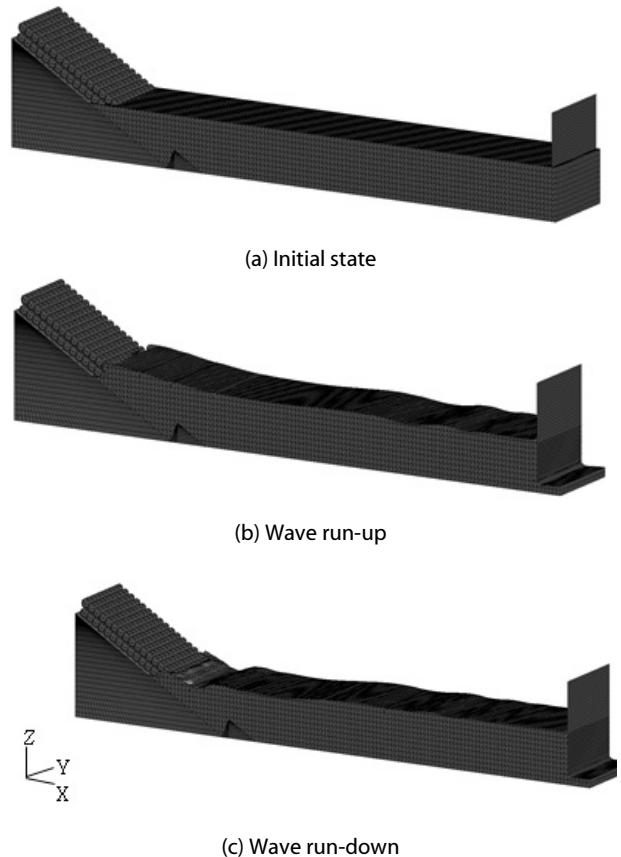
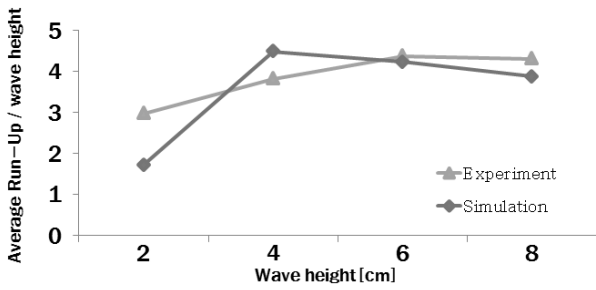
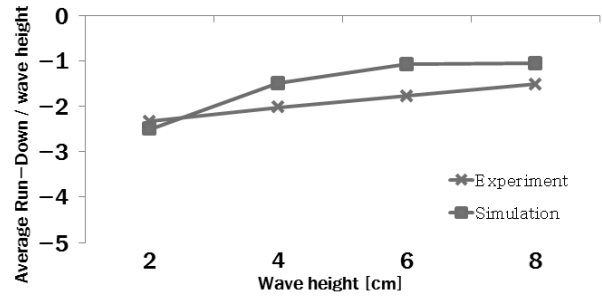


Fig. 6. Shape of Wave run-up and run-down of Simulation

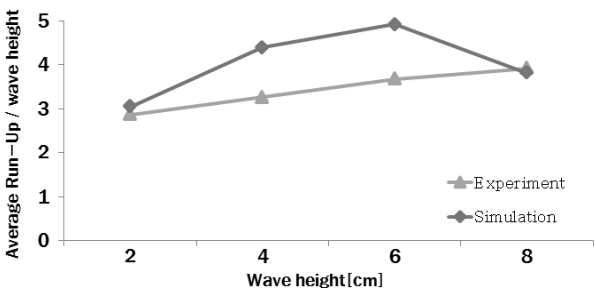


(a) Average run-up comparison

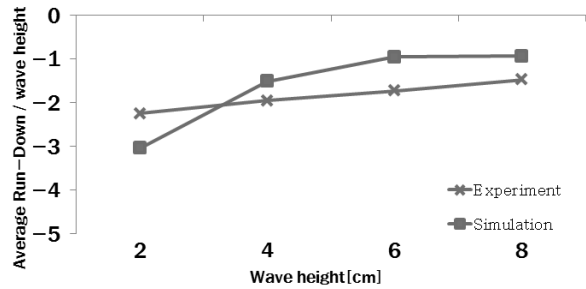


(b) Average run-down comparison

Fig. 7. Average Run-Up and Run-Down of Rubble Mound Structure Array I



(a) Average run-up comparison



(b) Average run-down comparison

Fig. 8. Average Run-Up and Run-Down of Rubble Mound Structure Array II

실험 결과와 해석 결과는 처오름 및 처내림 높이를 파고로 나눈 무차원 값을 파고에 대하여 나타내었다. 해석을 통하여 살펴본 처오름 및 처내림의 시간에 따른 형상은 Fig. 6에 나타내었다.

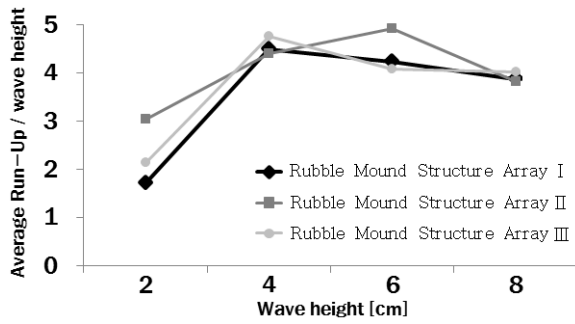
Figs. 7 and 8의 (a)와 (b)는 각각 사석배열 1형과 2형의 실험 결과와 해석 결과의 평균 처오름 및 처내림 높이를 비교하여 나타내었다. 사석배열 1형과 2형의 평균 처오름 및 처내림 높이를 확인한 결과 약간의 차이는 있지만 파고가 증가함에 따른 실험 결과와 해석 결과 값의 크기가 유사한 것을 확인할 수 있다. 실험 및 해석 결과에서 파고가 증가함에 따라 평균 처오름 및 처내림 높이의 증가폭이 감소하거나 더 이상 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 사석형 해안구조물이 일정한 파고 이상에서의 처오름 및 처내림 높이를 감소시켜 해저면의 침식을 저감시키고, 세굴현상 방지에 효율적인 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 세굴현상의 방지효과를 확인하기 위해서 다양한 사석형 해안구조물의 수치모형실험에 본 연구에서 사용된 해석 접근 방법을 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 4.2 해석적 수리모형을 활용한 쇄파효과 예측

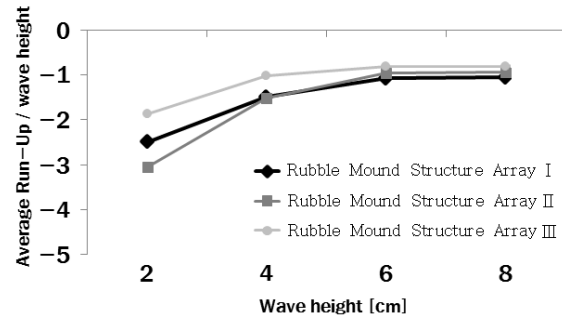
Fig. 9에는 사석모델 1형과 2형의 해석결과와 사석모델 3형의 처오름과 처내림 높이 해석결과를 비교하여 나타내었다. 부피비를

변화시켜 마찰면적과 사석 간의 공간이 서로 다른 사석배열의 쇄파효과 차이를 살펴보기 위하여 3개의 사석배열의 경사는 같도록 유지하고 처오름 및 처내림 높이를 비교하였다. 사석배열 1형의 사석구조물 부피가 1일 때 사석배열 2형은 1.092, 사석배열 3형은 0.53이 된다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 사용된 사석구조물의 양을 비교하였을 때 사석과 사석 사이의 공간이 적고 마찰면적이 많은 사석배열 3형이 쇄파에 있어서 가장 효율이 좋은 것을 확인할 수 있다. 또한, 단일 사석만으로 구성된 사석배열 1형과 3형의 경우가 2개의 사석이 복합 배열된 사석배열 2형에 비하여 효율이 더 좋았다.

부피비를 증가시키거나 감소시킬 때 실제 해안의 환경에 따라 사석 크기가 일정 이하로 작아져 파력을 버티지 못할 경우 유실되거나 이탈하여 쇄파효과를 얻지 못하게 된다. 해안의 특성을 고려하여 파력을 버틸 수 있도록 사석의 최소 설계중량을 산정하고 적절한 사석 크기와 형태를 결정해야 한다. 다양한 사석형 구조물을 사용할 경우 구조물의 배열형태에 따라 기울기가 변화하고 파랑과의 접촉 면적이 달라져 처오름 및 처내림에 영향을 주게 된다. 경사가 급해질 수록 처오름 현상이 많이 발생하게 되고 월파량이 많아지기 때문에 구조물의 배열 형태를 적절하게 선정하여 처오름 및 처내림을 감소시키고 해안침식을 방지하기 위한 효율적이며 경제적인 구조



(a) Average run-up versus wave height



(b) Average run-down versus wave height

Fig. 9. Average run-up and run-down Comparison of 3 Rubble Mound Structure Array

물의 배열형태, 기울기 등을 선정할 수 있도록 해야 한다(Lee et al., 2005). 적절한 사석의 크기와 형태, 배열을 결정하고 수치모델에 사용하여 해석 결과를 확인하면 수리모형 실험결과와 상호 보완적 관계로 활용할 수 있으며 사석구조물과 실험장비 제작에 소요되는 비용과 시간을 절약할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

환경에 따라 사석의 크기와 배열에 따라 사석이 파력을 버티지 못해 유실되거나 월파량이 증가하여 효율적인 쇄파효과를 얻을 수 없다. 적절한 사석의 크기와 형태, 배열형태를 선정하는 것이 중요하며 수치모형 해석에 사용하여 사석구조물과 실험장비 제작에 소요되는 비용을 절약할 수 있다. 본 연구에서는 세굴방지를 위하여 설치하는 다양한 해안 구조물 가운데 사석구조물을 대상으로 수치모형해석을 수행하고 수리조파실험의 결과와 비교분석하여 모델링 기법을 검증하였다. 세굴에 영향을 미치는 요인 중 초오름 및 차내림 높이에 대해서 실험 결과와 해석 결과를 비교분석하였다. 총 3가지 사석배열에 대하여 해석을 실시하였으며, 수리모형실험의 사석 크기와 배열형태를 반영한 사석배열 1형과 사석배열 2형에 대하여 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 그 결과, 낮은 파고가

가해질 경우 해석 결과와 실험 결과의 근소한 차이가 있지만 파고가 높아짐에 따라 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있으며, 수치모형의 해석결과와 수리모형 실험결과를 상호 보완적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 사용한 해석 모델기법을 활용하여 사석 배열에 따라 사석의 단위면적당 부파비를 비교하고 초오름 및 차내림 높이 감소효과를 살펴보았다. 사용된 사석구조물의 부파가 가장 작지만 마찰면적이 크고 구조물의 전체 높이가 가장 낮은 사석배열 3형이 초오름 및 차내림 높이의 감소효과가 큰 것으로 확인되었다. 추후 연구에서는 환경적인 특성을 반영하여 사석의 형태, 크기, 배열에 따른 다양한 사석구조물의 세굴방지효과를 분석할 수 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 #’09지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Janna, W. S. (1993). *Introduction to fluid mechanics 3rd ed. eds.* J. Plant, PWS Publishing Company, pp. 643-689.
- Kang, K. W., Kim, K. D. and Han, T. S. (2012). “Analytical performance comparison of scour protection of rubble mound structure shape using simulation.” *J. of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 32, No. 2A, pp. 117-122.
- Kim, J. H. (2007). “Shock response analysis under underwater explosion for underwater ship using ALE technique.” *J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 218-226.
- Kim, J. H. and Shin, H. C. (2008). “Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank.” *Ocean Engineering*, Vol. 35, pp. 812-822.
- Lee, S. H., Woo, J. H. and Cho, Y. S. (2005). “Run-up and overtopping of waves on slopes of rubble-mound breakwaters.” *J. of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 11, No. 38, pp. 947-954.
- Otsuka, M., Matsui, Y., Murata, K., Kato, Y. and Itoh, S. (2011). “A study on shock wave propagation process in the smooth blasting technique.” *8th International LS-DYNA Users Conference*.
- Slavik, T. P. (2009). “A coupling of empirical explosive blast loads to ALE air domains in LS-DYNA.” *7th European LS-DYNA Conference*.
- Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (1997). “Scour at the round head of a rubble-mound breakwater.” *Coastal Engineering*, Vol. 29, pp. 231-262.
- Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (2000). “Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater.” *Coastal Engineering*, Vol. 40, pp. 59-87.