

Cell Group을 이용한 파랑저감 및 양빈사 유실방지에 관한 실험적 연구 Experimental Study on Effectiveness of Wave Reduction and Prevention Erosion of Nourishment Sand Using the Cell Group

박상길* · 박홍범** · 김영환**

Sang Kil Park*, Hong Bum Park** and Young Hwan Kim**

요 지 : 최근, 해변모래의 침식을 방지하기 위해 잠제를 설치하고 있다. 잠제설치는 모래 침식의 손실을 최소화하기 위해 만들어졌다. 이런 이유로, 잠제를 무분별하게 전국적으로 계획하여 건설하고 있다. 그러나 해안선 유지를 위해 설치된 잠제는 상당히 문제가 있는 방법이다. 고가의 건설비, 해양공간이용, 해수수질, 해안선 변화 등의 단점도 있다. 특히, 해양 레저를 즐기는 이용자들은 해상공간이 단절되기 때문에 이를 좋아하지 않는다. 광안리와 같은 해수욕장은 인위적으로 양빈모래를 공급하여 해수욕장을 유지하는 곳이다. 연성공법이란 양빈모래의 유실방지를 위해 수중에 잠제를 대신하여 유동성 재질로 폭 넓은 연성구조물을 설치하는 공법을 말한다. 본 연구는 해변 침식을 완화할 수 있는 연성공법의 일환으로 cell group을 설치하였다. 즉, 양빈모래의 유실을 막기 위해 잠제 대신에 cell group을 사용하여 사빈침식의 정도를 완화 할 수 있는 공법을 적용한 것이다. 2차원 고정상 실험에서 cell group의 설치로 인한 파고감소효과 및 저반사율을 제시하였고, 이동상 수리모형실험에서, cell group 설치로 인한 양빈모래의 포착률과 양빈 모래의 침식방지율을 제안하였다. 따라서 수리모형실험의 결과에 의하면 침식해안의 사빈에 cell group을 설치하면 파고감소효과, 저반사율과, 양빈사의 침식방지율, 양빈사의 높은 포착률에 의해 양빈사의 유출이 방지되어 안정된 해안을 유지할 수 있었다.

핵심용어 : 셀군의 체원, 파고감소효과, 저반사율, 양빈사의 침식방지율, 양빈사의 포착률

Abstract : Recently, a submerged breakwater has been installing to prevent the erosion of shoreline everywhere. Artificially submerged breakwater is made to minimize the loss of nourishment sand beach erosion. For this reason, it has been indiscriminately constructed submerged breakwater that is planned in the country throughout. However, maintenance purposes to keep the shoreline of the beach is a method that is quite a few problems. There are also disadvantages such as expensive construction costs, ocean space utilization, water pollution and shoreline modification. In addition, person of utilizing the space of the ocean leisure does not like that because of the disconnection of ocean space. The beaches such as Gwanganri are artificially supplying nourishment sand to maintain the beach. The flexible construction method refers to a structure that is installed as a flexible material instead of submerged breakwater to prevent the loss of nourishment sand. In order to develop a new method to mitigate shoreline erosion, this study was carried out a hydraulic model experiment by installing a cell group as an example of the flexible method. Namely, in order to prevent the loss of nourishment sand, we decided to develop a new method that can mitigate the degree of beaches erosion by using cell group instead of submerged breakwater. In the two dimensional fixed hydraulic experiment, was carried out the effect reducing of wave height and the rate of low reflection due to the installation of the cell group. In movable bed experiment, the capture rate of the nourishment sand and the erosion prevention rate of the nourishment sand was performed for stability of shoreline. Therefore, according to the results of the hydraulic tests, it was possible to maintain the stable beaches due to installing the cell group on the erosion beaches, due to the effect of reducing wave height, the low reflection, the erosion prevention rate of nourishment sand, the high capture rate of nourishment sand.

Keywords : specification of cell group, effective of reducing wave height, rate of low reflection, rate of protect erosion of nourishment, capture rate of nourishment sand

*부산대학교 건설환경공학부 및 녹색국토물관리연구소(Dept. of Civil & Environmental Engineering and Green Land & Water Management Research Institute, Pusan National University)

**부산대학교 대학원 건설환경공학과(Corresponding author: Hong Bum Park, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Graduate School, Pusan National University Busan 46241, Korea, Tel: +82-51-510-2427, Fax: +82-51-513-9596, hbpark21@korea.kr)

1. 서 론

부산시 광안리 해수욕장의 수면공간은 해양스포츠를 즐길 수 있는 가장 큰 장점을 갖고 있는 곳이다. 해수가 맑고 깨끗하면서 넓은 해수면 공간이 펼쳐져 있어 이용자들은 마음의 안정감을 얻을 수 있다. 또, 이곳은 광안리해수욕장 배후의 발달된 상가와 편리한 교통, 배후를 바라보면 우뚝 솟은 가파르고 푸른 황령산, 하늘의 공간을 가로지르는 광안대교 등은 해양스포츠를 즐길 수 있는 해양공간으로서의 면모를 충분히 갖춘 곳이다. 즉, 광안리 해수욕장은 이름다운 산, 깨끗한 물, 넓은 공간이 한 곳에 어우러져 있는 절경을 연출시키는 장소이다. 광안대교는 바다위에 떠 있는 한 폭의 그림으로 자연과 인간공학이 조화를 이룬 곳으로 사람을 동시에 운집시킬 수 있는 매력을 가진 교량이다. 이러한 곳에 해안선을 따라 펼쳐진 광안리 해수욕장의 백사장은 이곳에 없어서는 안 될 무한한 가치를 부여하며, 동시에 경제적인 가치를 창출할 수 있다. 광안리백사장은 다른 어느 해수욕장의 백사장보다 경제적 창출 가치가 매우 높다는 것이다. 광안리 해수욕장을 유지하기 위해서는 양빈은 필수적이다. 양빈을 실시하는 방법은 여러 가지 공법이 있지만 가장 현실적인 방법은 sand by pass공법이다. Boswood and Murray(2003)는 호주 Queensland주의 Gold Coast 해안 북쪽 Nerang river 하구에서 시행된 sand by pass공법의 적용으로 해안을 유지 관리해야 하는 이유를 잘 기술하고 있다. Gold Coast 해안은 세계적인 관광해안으로 명성이 높다. 이러한 가치를 창출할 수 있는 공간을 일반적인 관리방법으로 관리를 하는 것은 바람직한 관리방법이 아니다. Magnor(2001)는 여러 측면에서 다양한 계획을 통한 관리방안을 제시하고 있다. 즉, 광안리 해수욕장의 유지관리방안에 대한 철저한 분석과 이에 상응한 정책이 있어야 한다는 뜻이다. 최근 우리나라 곳곳에 사빈유실을 방지하는 관리방안으로 일률적으로 무분별하게 잠제를 설치한 후에 해안에 양빈을 실시하여 모래의 유실을 최소화 하고자 하는 방안이 계획되어 시공되고 있는 실정이다. Sunamura and Mizuno(1987)는 침식해안 배후에 잠제를 설치하면 섬과 같이 모래가 퇴적되어 모래유실을 방지하여 Tombolo가 형성된다고 지적했다. 또, 잠제와 잠제의 사이인 간격부분으로 파랑이 집중되어 이곳은 해안선의 후퇴가 지속적으로 발생한다고 지적하였다. 이는 해수욕장의 해안선(물가선)의 굴곡으로 인해 이용객들께 불편을 제공할 뿐만 아니라 이곳을 통한 해수흐름이 자연적인 백사장 보다 강하게 발생하여 위험이 뒤따르고 있다. 해수욕객은 가장 안전한 곳에서 수영을 하면서 휴식을 원하고 있다. 잠제는 소형선박의 통행이나 서핑을 즐기는 이용자들은 가장 위험한 요소를 제공하는 수중구조물로 인식되어 있어 잠제가 설치된 곳을 통하여 해양스포츠를 즐기는 데는 아주 부적절한 장소로 인식되고 있다. 동시에 예측이 불가능한 상황이 발생할 수도 있다. 즉, 해수면 공간을 이용하여 해양스포츠 공간으로 활용하고자하는 목적에는

잠제는 해수면의 단절로 이용자들의 외면에 직면해 있다. 이러한 목적의 자연해안에 동일한 자연해저 경사로 cell group을 설치하면 설치된 cell group pockets(모래포집장치)으로 양빈모래를 포집시켜 쇄파에 의해 부유되어 먼 곳으로 흘러 나가는 양빈모래를 감소시킬 수 있는 방안이 연성공법의 일례이다. Cell group이 매우 폭 넓게 설치되므로 이것으로 인해 파고가 쇄파되면서 쇄파후의 파고가 감소하는 효과가 발생하고 있다. 특히 2차원 수리실험에서 쇄파에 의해 발생하는 이안류(return flow)의 흐름을 제어하면서 양빈모래의 유실을 저감시키고 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 고정상 실험에서는 양빈모래를 투입하기 이전에 cell group 설치로 인한 쇄파후의 파고 감쇠가 어느 정도 발생하고 있는지를 확인한 후에 반사율을 측정하여 저반사 효과를 밝히고자 하였다. 또, 이동상 실험에서는 양빈사의 유출방지효과를 밝히고자 하였다.

따라서 본 연구는 광안리해수욕장과 같이 이용도와 경제성이 매우 높은 도심 속 해수욕장의 유지관리를 위해 잠제를 설치하지 않고 해안침식 속도를 완화시킬 수 있는 cell group 공법을 개발하여 제안하고자 2차원의 고정상 및 이동상 수리실험을 통해 수리실험에서 검증된 쇄파후의 파고감쇠효과, 저반사율, 양빈사의 침식방지효과와 포착물을 밝혀 양빈사 유실방지를 위한 연성공법을 제안하고자 하였다.

2. 수리실험

2.1 고정상 수리실험 장치

2차원 수리모형실험을 실시하기 위해 사용된 2차원 불규칙파의 발생수조의 단면도는 Fig. 1과 같다. 수조의 제원은 길이 22.5 m 수조의 높이 1.0 m 수조의 폭 0.6 m이다. 수조 폭 60 cm를 1 cm의 아크릴 판으로 29.5 cm씩 양분시켜 한쪽 쪽에는 자연사면을 다른 한쪽에는 cell group을 설치하였다. 2차원 수리실험의 파고계측 장치는 Fig. 1과 같이 cell group을 설치하고 파고계를 설치하여 각 지점에서 파고를 측정하여 파고분석을 실시하였다. Fig. 1에서 1번 파고계는 내습하는 입사 파랑을 측정하는 지점이고 파고계 2번과 3번은 자연사면과 cell group을 설치한 동일사면의 수심인 지점에서 입사파와 반사파가 합성된 파랑이다. 4번 파고계는 cell group에 의한 파고 감쇠상태를 파악하기 위해 파고계를 이동하면

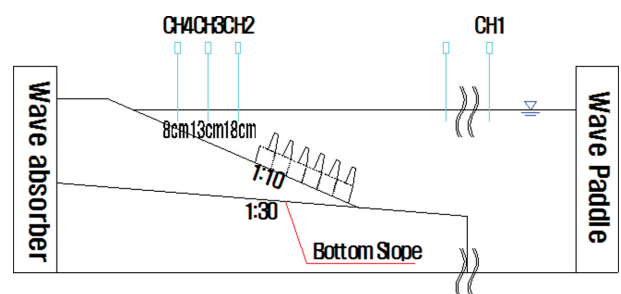


Fig. 1. Front view of hydraulic experiment with cell group.

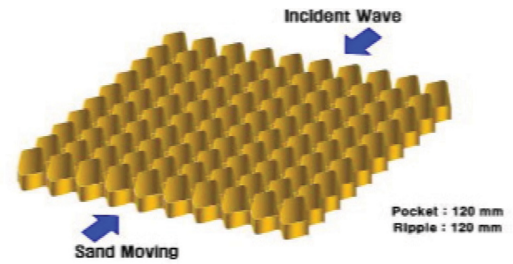
서 cell group 배후에 설치하여 cell group을 통과한 파고를 기록하였다. 파고감쇠효과를 파악하기 위한 수리실험 장치는 cell group의 규모(cell group 하부 모래 포집장치와 상부 파랑감쇠 장치의 크기)에 따라서 3가지 형태이다. Cell group의 파고감쇠기능을 검토하기 위해 cell group 크기에 따라 설치 지점을 다르게 하였다. 여기서는 cell group을 설치할 위치를 크게 3가지로 분류하였다. 이를 중요하게 판단하는 설치기준은 cell group이 단일수심에 설치되지 않고 폭이 넓은 cell group이 설치되기 때문에 자연사면에서 쇄파지점보다 수심이 깊은 심해지역, 파고가 부서지는 쇄파지역, 쇄파지역 보다 수심이 얇은 천해지역으로 구분하여 설치하기로 하였다. Cell group 설치에 따른 파고계의 위치는 cell group의 설치위치에 따라 6가지로 설치하였다. 물론 Fig. 1에 나타난 그림은 정확한 위치와 정확한 수심의 일례를 표현하고 있지만 실험의 경우에 따라 달라질 수 있다. Cell group의 크기가 큰 12 cm pocket cell만을 갖는 실험과 12 cm pocket 및 ripple cell을 동시에 갖는 복합형은 심해지역에 설치하였고, 6 cm pocket cell과 6 cm pocket 및 ripple cell의 복합형은 쇄파대에 설치하기로 하였다. 3 cm pocket cell 실험과 3 cm pocket 및 ripple cell의 복합형은 천해수심인 쇄파대 보다 얇은 수심에 설치하기로 계획하였다.

2.1.1 모형실험 계측장치

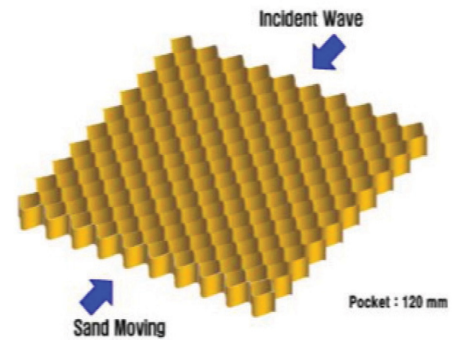
파고감쇠의 효과 및 반사율을 측정하기 위해 우선 4대의 파고계와 변환기 메모리 저장장치 등을 이용하여 모형실험을 실시하였다. 2차원 수리모형 실험 장치는 2차원 조파 수조내부에 불규칙파를 조파시킬 수 있는 조파 판이 상하로 구동하면서 불규칙파를 생성시킨다. 파랑분석은 용량식 파고계 파고 측정용 센서에서 감지한 전압을 파고분석용 시스템인 변환기를 이용하여 분석하였다. 조파기는 유압식 불규칙 조파기(피스톤형, 제조사: ISEYA), 수조의 제원은 22.5 m × 0.6 m × 1.2 m(L × W × H), 파고계는 용량식 파고계(6 channels 제조사: KENEK)를 이용하였으며, AD 변환기(analog to digital convertor)는 데이터 수신방식으로 센서가 감지한 전압을 변환시켜 파고를 분석하였다.

2.1.2 수리실험 장치제작

고정상의 모형제작에 사용된 기하학적 축척비의 범위는 1/20을 사용하고 있으며 본 실험에서는 cell group의 모형을 1/20로 선정하여 실험을 실시하기로 하였다. 축척을 여러 가지로 선택할 수 있는 조건은 이번 실험이 완료된 후에 실제의 적용성에 대해 검토하기로 한다. 이유는 이동상 실험에서 가장 어려운 조건을 만족하는 모래형상과 크기의 축척은 해결하기 어려운 난제이므로 여기서는 단일 현지모래의 입자를 사용하기로 하였다. 축척 1/20은 비교적 파랑의 재현성을 나타내는 실내 수리모형실험에 널리 사용하고 있는 값이다. Fig. 2의 (a)는 모래 포집장치인 12 cm pocket 및 ripple cell의 복



(a) Complex type cell group of pocket and ripple.



(b) Cell group of pocket only.

Fig. 2. One example of cell group in experiment.

합형이며 (b)는 모래 포집장치만 있는 12 cm pocket cell의 group을 도형화 시킨 것이다. 그리고 이들을 수리실험에 적용할 경우 현실적으로 만들어진 모양을 그대로 형상화 시켰다. 화살표 방향은 2차원 실험에서 파고가 내습하는 방향이다. 가장 큰 12 cm의 pocket 및 ripple cell은 현실적으로 파랑감쇠 효과와 양빈모래 포집형으로 설계되어 있다.

2.1.3 고정상 실험종류

고정상 모형제작은 해저바닥을 1/10 경사로 설정하였다. 폭 60 cm를 아크랄 판으로 29.5 cm로 양분하여 유리면은 자연해안으로 제작하였고 뒷부분은 cell group을 설치하여 인공적인 해안을 조성하였다. Cell group의해 파고 감쇄효과와 반사율을 파악하기 위해 cell group을 6종류로 제작하여 입사 파고가 cell group에 의해 어느 정도의 파고를 감쇠시켜 파고감쇠효과를 보이고 있는지를 검증하기로 하였다. 다음 Table 1은 고정상의 수리모형실험의 경우를 정리한 표이다.

Table 1. Conditions of fixed bed hydraulic experiment

Case	Cell group type (cm)		Located measurement (cm)
1	Natural slope		8 cm, 13 cm, 8 cm
2	12 pocket	with, without	18 cm, 13 cm, 8 cm
3	12 pocket + ripple	with, without	18 cm, 13 cm, 8 cm
4	6 pocket	with, without	8 cm, 13 cm, 8 cm
5	6 pocket + ripple	with, without	13 cm, 8 cm
6	3 pocket	with, without	6.5 cm, 5 cm, 3.5 cm
7	3 pocket + ripple	with, without	6.5 cm, 3.5 cm

Table 1은 cell group의 규모와 형태를 기본으로 이들 규모에 따라 어느 정도의 내습파고 감쇠효과를 가져 올 수 있을 것인가를 cell group 설치전후에 따라 수심별로 검증하게끔 정리한 것이다. 따라서 Case 1은 해안경사 1/10이며 수조 폭 60 cm를 각각 29.5 cm씩 1 cm의 투명 아크릴로 두 개로 분리시킨 경우에 대한 기본적인 수리실험을 수행한 경우로 가장 먼저 파고 값을 측정해 둔 경우이다. Case 1에서 고정상의 반사율을 측정하였다. Case 2~Case 7은 cell group을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교분석하기 위해 실시한 실험조건이다.

2.2 이동상 실험 장치

2.2.1 이동상 실험장치

고정상 실험장치를 기본으로 여기서는 먼저 침식형 해변을 조성하기 위해 전체 바닥경사 1/30 위에 재차 모래유실이 쉽게 되도록 해저경사를 1/10로 하였다. 본 연구에서는 cell group 설치로 인한 파랑감쇠효과를 파악하기 위해 cell group 유무상태에서 동일조건에서 파고를 기록하여 분석하였다. 동일시간에 동일조건으로 고정상과 이동상에서 동시에 실험을 할 수 없어 파고실험결과분석은 고정상에서만 실시하기로 하였다. 이동상에서는 시간에 따라 지형의 변화와 양빈모래의 포집능력을 파악하여 양빈모래의 이동에 따른 지형변동과 잔류율과 포착율을 계산하기 위해 실험을 실시하였다. 이러한 급경사 사빈은 현장관측을 통하여 사빈의 침식이 가장 많이 발생하는 단면을 기준으로 전형적인 침식사빈을 조성하기 위한 것이다. Table 2는 연구자들의 침식해안 한계조건들이다.

2.2.2 이동상 모형사 결정

이동상 실험을 수행하기 위해 모형사를 기하학적 및 운동학적 조건에 맞는 축척을 결정하여 실험을 실시하는 것이 현장을 가장 잘 파악할 수 있다. 그러나 이들 조건에 맞게 모형사의 규격을 정하여 이동상 실험을 실시하기는 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해 현지조사를 실시하여 광안리해수욕장에서 침식이 심하게 발생하는 단면을 택하여 이동상 실험을 실시하기로 하였다. 해수욕장의 현장입경조사의 분석을 참조하면 해안선부근에는 중앙입경 d_{50} 이 0.018~0.48 mm, 수심이 깊은 심해부분에는 0.06~0.36 mm가 분포하고 있다. Rector (1954)와 Sunamura(1975)는 양빈모래의 안정해빈경사를 추정

하는 식을 제안하였다. 이들 식에서 안정경사를 토대로 모형사를 역으로 산정하면 다음과 같다. 즉, 현지의 모래입자의 중앙입경을 $d_{50p} = 0.06\sim0.48$ mm로 하면 모형사의 입경은 $d_{50m} = 0.018\sim0.117$ mm가 된다. 이 모형사를 그대로 사용하면 실험 초기에는 부유사가 발생되지만 시간이 지날수록 쇄파대보다 깊은 수심에서는 저질이 점토질의 성질을 가지게 되므로 지형변동의 영향을 파악하기가 매우 어렵다. 쇄파대 내에서는 계산된 모형사를 사용하면 부유사가 탁월하게 발생되어 쇄파대(surf-zone)에서는 세굴, 소상대(swash-zone)에서는 퇴적이 형성되는 현상이 발생된다. 본 연구에서는 정확한 축척의 개념보다는 현장의 개념을 살려서 이동상실험의 목적에 따라 모형사를 설정하여 규격을 정하였다. 이는 실험의 목적에 따라 연구자가 추구하는 실험의 목적을 명확하게 하고자 하는 것이다. 여기서는 주문진 표준사를 이용하여 다시 체분석으로 중앙입경 mm로 정하였다. 또, 이동상 실험에서 cell group 설치 수조의 사면 및 설치하지 않는 수조의 사면에 모래층의 깊이를 18~36 cm로 쌓아서 제작을 하였다. Table 2를 이용하여 해변의 연안사주의 발생을 위해 로 Nayak(1970)의 연안사주 발생한계에서 제시한 값으로 폭풍해빈(storm beach)에 속하는 침식해빈을 만들었다. 이동상 수리모형실험의 목적의 가장 중요한 것 하나는 동일조건에서 포착율을 파악하기 위한 것이다. Cases 1에 대해서는 포켓의 기능을 파악하기 위해 지형변동을 사진으로 정리하여 cell group의 양빈모래 포집기능을 확인하기로 하였다. 이를 토대로 하여 Cases 2는 cell group을 설치 할 경우와 설치하지 않을 경우에 대한 지형변동을 4시간 간격으로 측정하여 양빈모래의 2가지 기능인 포착율과 해빈단면의 변화 등을 검증하기로 하였다. Table 3은 이동상 수리실험을 정리한 것이며 Fig. 3은 cell group을 설치한 이동상 실험의 평면도이다.

Table 3. Experimental cases of movable bed

Case	Cell group type	Measuring interval for landscape variation	Observation objects
1	6 cm pocket + ripple	Every 2 hours (total 8 hours passed)	Topography of bed
2	3 cm pocket + ripple	Every 4 hours (total 20 hours passed)	Capture rate of nourishment sand

Table 2. Critical conditions of erosion beach

Researcher	H_0/L_0	H_0 (cm)	d_{50}	Density
Jonsson	$H_0/L_0 > 0.03$	$H_0 > 4.68$	No	No
Iwakaki.	$H_0/L_0 > 0.045$	$H_0 > 7.02$	Yes	Yes
Noda	$H_0/L_0 > 0.03$	$H_0 > 4.20$		
Nayak		$H_0 > 6.90$	Yes	Yes
Horikawa.	$H_0/L_0 \geq 7(\tan\theta)^{-0.27}(d/L_0)^{0.67}$	$H_0 \geq 6.58$	Yes	No
Sunamura				

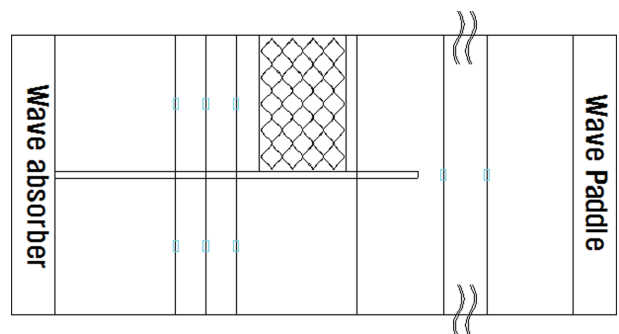


Fig. 3. Floor plan of movable bed hydraulic experiment.

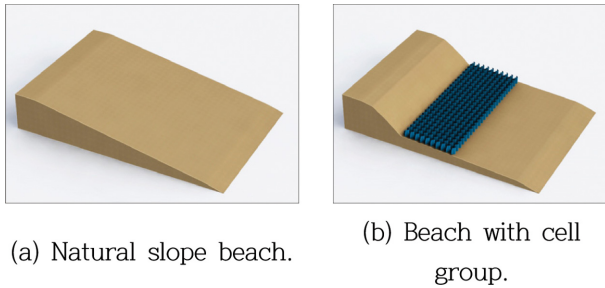


Fig. 4. Beach with 3 cm pocket and ripple of cell group.

2.2.3 지형변동 모형과 cell group 설치

Table 3은 이동상수리실험의 경우를 정리한 것으로 Case 1과 Case 2에서 언급했듯이 실험의 목적이 다르다. 따라서 Case 2에 대해 수리실험시간에 따라 지형변동에 의한 양빈모래의 포착률과 침식방지율을 측정하기로 했다. 이동상에서는 시간에 따라 지형의 변화와 양빈모래의 포집능력을 보고 지형변동에 의한 포착률을 계산하기 위해 실험을 실시하였다. 이동상 실험에 사용된 cell group은 Fig. 2의 3 cm 높이의 pocket 및 ripple을 갖는 복합형 cell group이다. 즉, 모래 포집장치와 파고감쇠 장치가 부착된 cell group을 도형화 시킨 것으로 Fig. 2의 화살표 방향은 2차원 실험에서 파고가 내습하는 방향과 양빈 모래가 유출되는 한 방향을 표시한 것이다. 3 cm의 pocket은 유출되는 양빈사를 포집하고, 상부에 부착된 3 cm의 ripple은 파고를 감소시키는 기능을 한다.

따라서 cell group은 수심, 파고, 파향, 지형 등의 해안특성에 따라 cell의 규격을 자유롭게 조절하여 설치 가능하므로 침식해안을 안정시킬 수 있는 가장 경제적인 연성공법의 하나로 볼 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 위치에 설치된 침식사빈과 cell group 설치사빈을 확장시켜 도시화 시킨 것이다. 즉, 침식된 사빈에 cell group을 설치하여 사빈의 안정화를 시키기 위한 이동상실험을 실시하기 위한 단면의 일례이다.

2.3 불규칙파랑 시계열

불규칙파랑제원은 $H_{1/3} = 14$ cm, $T_{1/3} = 0.98$ sec, $H_o/L_o = 0.093$ 의 심해파형경사를 갖는다. 이 파랑을 조파시켜 파고감소, 저반사율, 시간경과에 따라 최초 상태의 양빈모래이동과 지형의 형태를 파악하였다. 실험에 사용한 조파파고는 불규칙파를 이용하였고 조파장치로서 주기는 0.4초에서 2.5초까지 조파할 수 있다. 또 주기가 길 때는 고 파랑을 얻는데도 약간의 어려움이 있으므로 실제 정확한 주기로 사용할 수 있는 최적의 주기범위는 모델의 주기로 0.7초에서 2.0초가 가장 적당한 범위이다. 사용된 파고계는 용량식 파고계로서 파랑이 발생하면 파고계의 센서에 받는 힘이 전압으로 변환되어 저장되면 이것을 다시 AD 변환기에서 파랑의 시계열을 얻을 수 있다. 이후 수위의 진폭에서 파고를 얻을 수 있다.

Fig. 5는 실험에 사용된 증복파 및 반사파의 일례를 도시한 것이다. Fig. 5의 위 시계열은 입사파와 반사파를 동시에

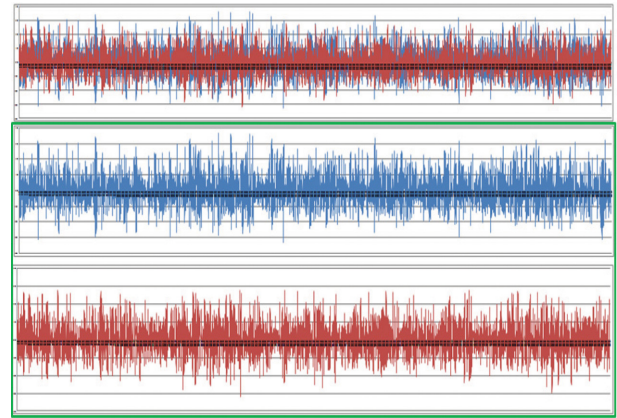


Fig. 5. Example of time series of irregular wave.

S(f) (m²sec)

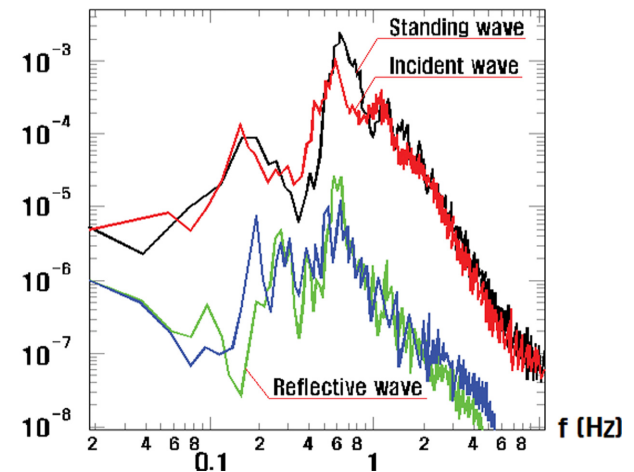


Fig. 6. Example of spectrum for synthetic wave and reflection wave (JONSWAP, 1977).

도시한 것이고 중간은 입사파의 시계열, 하단은 반사파의 시계열을 도시한 것이다. Fig. 6은 실험파의 에너지 스펙트럼형을 주파수에 따라 도시한 것이다. Fig. 6에 표시한 바와 같이 cell group을 설치한 경우와 설치하지 않는 경우에 대한 에너지 스펙트럼을 도시하였다. Cell group을 설치한 경우와 cell group을 설치하지 않는 경우보다 피크 값이 약간 높다. 이는 풍파인 Bretschneider(1959, 1963) and Mitsuyasu(1970, 1971)의 스펙트럼형상 보다 피크 값이 예리하게 솟아 있다. 첨예도를 나타내는 요소는 $\gamma = 1$ 이면 스펙트럼형상은 동일하다. 이들의 스펙트럼 γ 의 값은 $\gamma = 1 \sim 7$ 이며, 평균값은 $\gamma = 3.3$ 이다.

3. 고정상 실험결과 분석

3.1 Cell group의 반사율

Park et al.(2016)은 geo-cell을 이용한 파고감소효과와 양빈사 유출방지에 대한 실험을 실시하여 이들의 효과를 제안했다. Cell group을 사빈에 설치하면 설치하지 않을 경우보

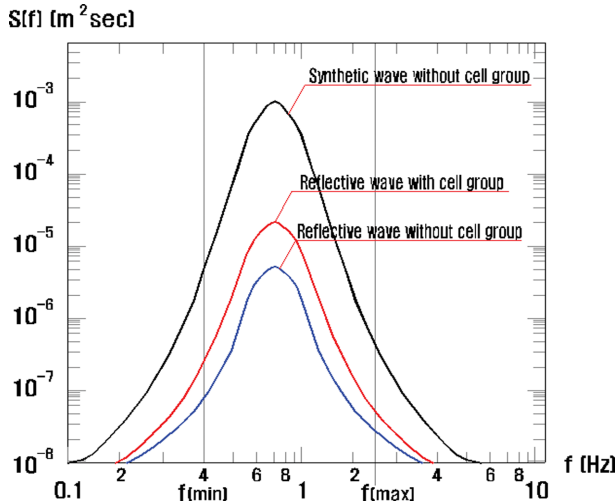


Fig. 7. Energy spectrum of synthetic wave for cell group.

다 중복과 발생이 예상된다. 이는 cell group에 의해 어느 정도의 중복과가 발생하여 입사파에 대한 반사율이 발생할 것인가를 검증하는 단계이다. 또, Fig. 6은 cell group을 설치한 곳의 입사파와 반사파에 대한 스펙트럼의 형상으로 반사파의 스펙트럼 폭이 입사파 스펙트럼 폭보다 좁게 나타나고 있다. 불규칙파의 반사율은 Goda(1970, 1977)의 2점법을 이용하여 실측된 시계열을 분석하여 파의 에너지를 가지고 반사율을 구하였다. 주파수의 범위는 Fig. 7에서와 같이 $f_{\min} = 0.04 \sim f_{\max} = 0.25$ 의 범위로 하여 스펙트럼에너지를 구하여 반사율을 구하였다. Fig. 7은 cell group의 설치 유무에 따라 주파수 $f_{\min} = 0.04$ 와 $f_{\max} = 0.25$ 사이에서의 에너지를 구하여 반사율을 구한 일례이다. Cell group의 규격에 따라 반사율의 결과 값이 다르다. Cell group의 규격이 클수록 반사율이 증가한다. 반사율의 범위는 0.12~0.25임을 알았다. 이는 고정상 실험에서 cell group이 클수록 반사율이 증가하였다. 그러나 cell group을 설치하여 반사되는 반사율 범위는 0.12~0.25로서 잠재와 같은 강성구조물에 비교하면 저반사의 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 Cell group에 의한 파고감소 효과

Cell group 설치로 인해 입사파고의 감소율을 검토하기 위해 측정 No. 1은 조파전면의 심해수심의 입사파 시계열, No. 2는 천해수심으로 1/10의 자연사면 시계열, No. 3은 천해수심으로 1/10의 자연사면위에 설치된 cell group 전면의 시계열을 최대파고, 유의파고, 평균파고로 분석하여 설치수심에 따라 파고의 감소율을 검토하였다. Fig. 8~Fig. 10의 횡축은 설치수심 h 과 입사파장 L_i 인 상대수심 h/L_i 로 무차원화 시킨 값이고 종축은 단위로 수심을 나타내고 종축은 실측파고와 입사파고의 비를 H/H_i 로 무차원화 시킨 값이다.

3.2.1 심해수심에서 파고감소 효과

Cell group을 설치수심에 대한 입사파장의 $0.5L_i$ 인 일정폭

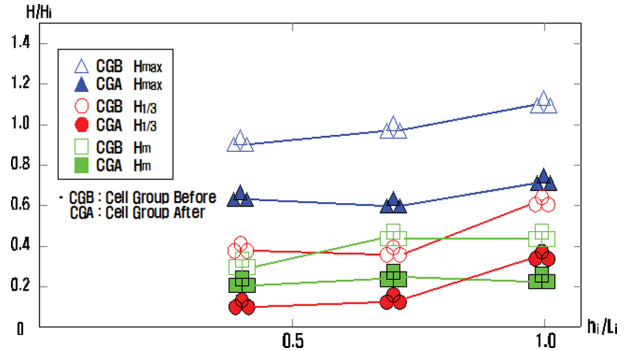


Fig. 8. Wave reduction effect by 12 cm pocket-ripple cell group.

으로 설치하였다. Cell group의 폭을 일정하게 하고 이곳을 통과한 파고를 측정하여 파고감쇠효과를 분석하였다. 심해수심이란 자연사면에서 파고가 쇄파되는 쇄파대 보다 심해지역을 말하는 것으로 파고감쇠효과는 어떤 수심에 설치해도 효과가 있는 것으로 나타나고 있다. Fig. 8은 12 cm pocket 및 ripple cell의 복합형에 의한 설치전후의 파고감쇠효과를 그림으로 도시한 것이다. 물론 심해지역에 설치하여 cell group 배후 수심 18 cm, 13 cm, 8 cm에 대해 파고를 측정하여 분석하였다. 어느 경우나 파고 감쇠효과는 있는 것으로 볼 수 있다. 대부분의 파고가 쇄파되어 측정지점에 내습하므로 파고 감쇠효과가 어느 정도 나타나고 있는 경향이 있다. 여기서 CGB는 설치 전(cell group before)의 파고 값을 CGA는 설치 후(cell group after)의 파고 값을 나타낸다. Fig. 8의 동일 수심에서 불규칙파고의 최대 값, 유의파고, 평균값을 서로 비교하면 그림에서 알 수 있듯이 파고가 클수록 수심이 얕을수록 파고 감쇠효과는 크다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 쇄파대에서 파고감소 효과

여기서 쇄파대란 수심 13 cm 위치에서 파고를 측정한 곳으로 이곳에서 불규칙파의 파고들이 대부분 쇄파되는 곳으로 볼 수 있다. Fig. 9는 6 cm pocket 및 ripple 복합형 cell group에 대한 설치수심으로 쇄파대를 중심으로 설치했다. 어느 경우나 파고 감쇠효과는 있는 것으로 볼 수 있다. 대부분의 파고가 쇄파되어 측정지점에 내습하므로 파고 감쇠효과가 크게 나타나고 있다. 파고감소의 원인은 Galvin(1968)의 horizontal roller가 발생되는 폭을 기준으로 파고감소효과가 나타난다.

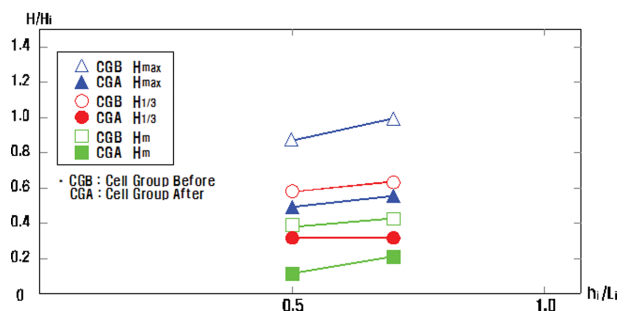


Fig. 9. Wave reduction effect by 6 cm pocket-ripple cell group.

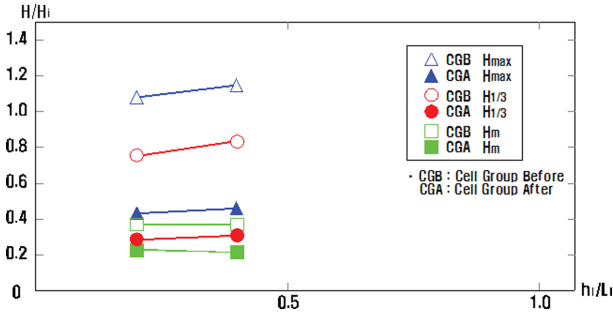


Fig. 10. Wave reduction effect by 3 cm pocket-ripple cell group.

Sawaragi and Iwata(1974)는 이를 실험을 통하여 파고감소 효과를 검증하였다.

3.2.3 쇄파 이후 수심

여기서 쇄파 이후 수심이란 가능한 8 cm 위치에서 파고를 측정 한 곳으로 유의파고 $H_{1/3}$ 보다 적은 파고도 일부 쇄파되며 H_m 는 대부분 통과되고 일 부분이 쇄파가 되면서 파고의 감쇠가 발생하고 있다. Fig. 10은 3 cm pocket cell group과 3 cm pocket 및 ripple 복합형 cell group에 대한 파고 값을 나타내고 있다. 설치수심은 쇄파대 이후의 천해수심을 중심으로 설치했다. 여기서도 특별한 현상이 없이 어느 경우나 파고 감쇠효과는 있는 것으로 볼 수 있다. 대부분의 파고가 쇄파되어 측정지점에 내습하므로 파고 감쇠효과가 크게 나타나고 있다. 즉, 유의파고 $H_{1/3}$ 보다 적은 파고도 대부분 쇄파되며 H_m 도 일부가 통과되고 대부분이 쇄파가 되면서 불규칙파의 파고들이 대부분 쇄파되는 곳으로 볼 수 있다. 또 Fig. 10은 cell group 설치 전후에 대한 파고감쇠효과를 도시한 것이다.

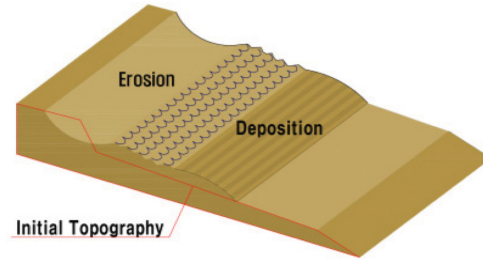
3.3 이동상 실험분석

3.3.1 Cell group에 의한 양빈사 이동 상태

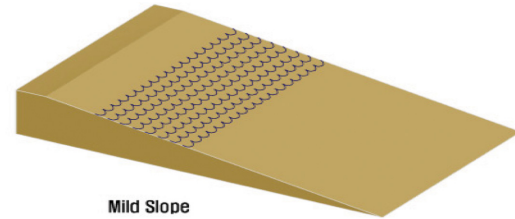
Fig. 11의 (a)와 같은 사면에 cell group을 설치하여 조파를 발생시키면 조파시간에 따라 양빈사의 이동이 발생된다. 이를 살펴보면 수심이 깊은 곳에서 cell group 내부에 양빈사가 포착되어 점차 물가선의 얕은 곳으로 이동된다. 최후에는 Fig. 11의 (b)와 같은 결과를 얻는다. 즉, 양빈모래가 cell group 내부에 유입되어 퇴적되어 가는 현상을 볼 수 있다. 물가선이 침식되면서 양빈모래가 cell group 내부에 유입되어 최후는 최초 지형의 붉은 선이 (b)와 같은 완만한 경사를 갖는 사빈이 된다.

3.3.2 Cell group에 의한 지형변동

Fig. 12는 종축에 모래의 높이를 mm로 횡축에 수심을 cm 단위로 표시하여 지형변동을 조파시간 경과에 따라 도시했다. Fig. 12의 얇은 검은 선은 10:1 경사면이며 빨간 선은 조파 전 모래높이, 검은 선은 4시간 후 모래높이, 녹색 선은 8시간 후 모래높이, 노란 선은 12시간 후, 파란 선은 16시간 후, 연보라 선은 20시간 후 모래높이를 도시한 것이다.



(a) Process of deposit into cell group.



(b) The complete deposition section by cell group.

Fig. 11. Process of beach deposition by cell group.

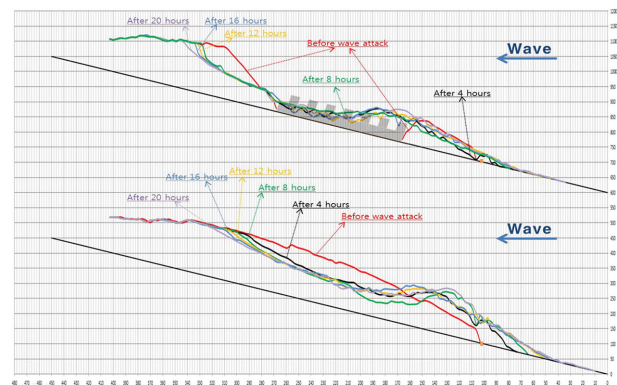


Fig. 12. View of landscape variation according to time.

실험의 진행과정에서 양빈사의 이동현상을 보면 물가선이 침식되면서 양빈사가 유출되어 수심이 깊은 곳부터 cell group 내에 포집되어 수심이 낮은 곳으로 퇴적되어 간다. 양빈사는 cell group을 넘어서 깊은 곳으로 유출이 되지 않고 cell group 내에 포착되어 퇴적된다.

3.3.3 Cell group에 의한 유출량과 포착량

지형변동이 조파시간 20시간이 경과한 후에는 거의 발생하지 않고 안정된 상태로 되었다. 따라서 4시간에서 20시간에 대한 유출량과 포착량을 구하기로 하였다. 여기서 유출량의 계산은 Fig. 12에서 정해진 이동한계수심은 Birkemeier(1985)와 Hallermeier(1978)이 제안한 이동한계수심의 추정 식에서 구하였다. 이 수심을 넘어서 외부로 유출된 면적을 삼각형 및 직사각형으로 가정하고 측면의 단면적을 구한 후에 폭을 곱하여 유출된 양빈사의 부피를 산출했다. 여기서, 양빈사가 일정수심을 넘어 유출되는 이동한계수심은 Hallermeier(1978)가 현지해안에 대한 이동한계 수심의 추정을 위해 단면변화의 실

Table 5. Comparison of nourishment sand erosion quantity before and after cell group installation

Category (cm ³)	Elapse time for wave generation (hr)				
	4	8	12	16	20
Before cell group	224.3	243.4	267.2	305.7	348
After cell group	71.1	76.6	83.4	92.1	101.3

Table 6. Comparison of quantity nourishment sand flow out quantity before and after cell group installation

Category (cm ³)	Elapse time for wave generation (hr)				
	4	8	12	16	20
Before cell group	243.6	263.9	302.0	366.6	417.9
After cell group	75.2	83.9	92.8	104.4	115.8

험결과를 기본으로 제안된 것으로 이는 미국과 호주해안에서 타당성을 확인하였다. Birkemeier(1985)는 검증된 이동한계 수심의 추정 수정식을 제안하였다. 이렇게 구한 값을 검정하기 위해 실측한 양빈사량과 비교한 결과 98%가 일치하였다. Table 5는 cell group 설치 전후에 대한 침식량을 조사한 값이고 Table 6은 cell group 설치 전후에 대한 침식된 양빈사량이 일정수심보다 깊게 유출된 양빈사량을 제시한 표이다. 이들 표를 비교해 보면 cell group를 설치한 것이 양빈사의 유출이 동일시간에 현저하게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 여기서 침식량(erosion quantity)은 초기지형에서 조파경과시간에 따라 침식되어진 양이며 유출량(outflow quantity)은 cell group 설치지점을 넘어 이동된 양빈사량을 뜻한다. 따라서 cell group 설치로 인해 침식량과 유출량이 급감한 이유는 cell group 설치 전후의 차이만큼의 양빈사량이 cell group 내부에 포착되어 퇴적되어 있다는 것이다. 이것을 이용하여 침식방지율과 포착율을 구하기로 한다.

3.4 Cell groups에 의한 침식방지율 및 포착율

실험결과 양빈사의 침식방지율(rate of erosion protect: E_{pr})과 포착율(rate of capture: C_r)을 산정하기 위해 포착율을 정의하기로 한다. 잔류율(rate of residual: R_r)이란 일정기간 동안에 일정장소에 남아 있는 모래량을 처음 양빈한 모래량으로 나눈 값에 100을 곱하여 %로 정의하고 있다. 이를 이용하여 본 연구에서는 포착율을 잔류율과의 동일한 개념으로 이용하기로 한다.

침식방지율 E_{pr} 은 경과시간 Δt 사이에 양빈한 모래가 파랑에 의해 cell group 설치 이후에 침식된 침식량 ΔV 를 cell group 설치 이전에 침식되어 흘러 나간 전침식량 V_o 로 나누어 100을 곱하여 %로 정의하였다. Cell group 설치로 인해 침식방지율 E_{pr} 은 식(1)과 같이 계산된다.

$$E_{pr} = \frac{V_o - \Delta V}{V_o} \times 100(\%) \quad (1)$$

또, 포착율 C_r 도 cell group을 설치했을 때 흘러 나간 전체

Table 7. Erosion protect rate and capture rate of nourishment sand due to elapse time

Category (%)	Elapse time (hr)				
	4	8	12	16	20
Erosion protect rate	68.30	68.47	68.79	69.87	70.89
Capture rate	69.13	68.21	69.27	71.52	72.29

양빈사량을 cell group을 설치하지 않았을 경우 흘러나간 전체 양빈사량으로 나누어 100을 곱하여 %로 나타낸다. 침식방지율 E_{pr} 과 포착율 C_r 과의 관계는 이용개념에 따라 약간 다르다. 침식방지율은 초기 지형을 기본으로 하여 사전에 침식을 방지하는 차원이지만, 포착율은 침식된 후의 양빈사가 일정수심을 넘어 흘러 나가지 못하도록 양빈사량을 포착시켜 사빈의 안정을 도모하자는 것이다. 따라서 cell group을 설치하여 지형변동에서 얻어진 침식된 침식방지 양빈사량과 cell group에 포착된 포착양빈사량을 가지고 침식방지율 E_{pr} 과 포착율 C_r 을 구하여 조파시간에 따라 정리한 값이 Table 7과 같다. 이 표에 의하면 cell group을 설치하면 설치하지 않을 경우보다 평균 69.26%의 침식방지를 할 수 있고, 침식되어 심해로 이동되는 양빈사를 포착하여 안정된 사빈을 유지할 수 있는 양빈사의 포착율도 70.1%로 높일 수 있다.

4. 결 론

4.1 고정상 결론

각 수심별로 6가지의 cell group를 가지고 수심별(심해, 쇄파대, 쇄파이후)로 파고감쇄 효과를 조사하였다. 수리실험결과에 의하면 cell group의 pocket 및 ripple에서 파고감쇄 효과를 볼 수 있었다. 파고감쇄효과는 심해지역, 쇄파대, 쇄파후 천해지역 순으로 나타나고 있으며 파고감쇄 기구는 쇄파후에 생성되는 물입자와 공기의 접촉에 의해 형성되는 물거품(horizontal roller)과 저면마찰에 의한 감쇄효과로 볼 수 있다. 감쇄효과의 크기로는 최대파고, 유의파고, 평균파고의 순이며, 감쇄원인으로는 horizontal roller가 cell group pocket 또는 ripple를 통과하면서 에너지 저감을 가져오므로 파고의 감쇄가 발생한다. 동시에 cell group의 설치로 인한 반사율은 25%보다 낮아 저반사 효과를 확인하였다.

4.2 이동상 결론

1) Cell group에 의한 양빈사 유출방지 공법은 침식형 자연해빈을 유지관리 하는 방법 중 최적의 유연성 있는 연성공법의 하나이다.

2) Cell group에 의해 양빈사가 cell group 내부에 포집되어 쌓여 있는 지표(index)인 침식방지율과 포착율을 제시하였다. Cell group을 설치하면 유출되는 양빈사량의 70%를 포집할 수 있다.

3) 유출되는 양빈사는 cell group에 의해 사주를 발생시키

지 않고 cell group의 내부 포켓에 잔류하여 심해유출도 없다.

4) Cell group은 광안리와 같은 폐쇄만에 잠제설치를 대신 하여 양빈사의 유출방지를 위한 유연성을 갖는 적절한 연성 공법이다. 본 공법은 양빈을 계획하는 해안에 적용하면 잠제에 비해 양빈사 유출방지 효과가 클 것으로 예상된다.

5) Cell group을 3차원 수리실험실에 설치하여 간단한 실험 중에 있다. 이후 현장(test bed)에 설치하여 실증검증을 하는 것이 추후의 연구과제이다.

References

- Birkemeier, W.A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. J., Waterw., Port, Coastal and Ocean Eng., (3), 598-602.
- Bretschneider, C.L. (1959). Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves. U.S. ArmyCorps of Eng., Beach Erosion Board Tech. Memo., No. 51, pp24.
- Bretschneider, C.L. (1963). A one-dimensional gravity wave spectrum. Ocean wave spectra, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 41-56.
- Boswood, P.K. and Murray, R.J. (2003). World-wide sand bypassing system: date report, Conservation technical report No. 15. Queensland Government, pp59.
- Galvin, C.J. (1968). Breaker type classification on three laboratory beaches. J. of Geophys. Res., 73(12), 3651-3659.
- Goda, Y. (1970). Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation. Report, Port and Harbour Res. Inst., 9(3), 3-57 (in Japanese).
- Goda, Y. (1977). Numerical experiments on statistical variability of ocean waves Rept. Port and Harbour Res. Inst., 16(2), 3-26 (in Japanese).
- Hallermeier, R.J. (1978). Uses for a calculated limit depth to beach erosion. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., 1493-1512.
- Houmb, D.G. and Overvik, T. (1977). On the statistical properties of 115 wave records from the Norwegian continental shelf. Div., Port and Ocean Eng., The University of Trondheim, The Norwegian Inst., 183.
- Magnor, K. (2001). Shoreline Management Guidelines (DHI) Water and Environment, 177-181.
- Ministry of Transport Port Authority. (1979). Construction Manual of Artificial beaches pp 112 (in Japanese).
- Mitsuyasu, H. (1970). On the growth of the spectrum of wind-generated waves. Coastal Eng., 13, 1-14 (in Japanese).
- Mitsuyasu, H. (1971). On the form of the fetch-limited wave spectrum, Coastal Eng., 14, 7-14 (in Japanese).
- Nayak, I.V. (1970). Equilibrium profile of model beaches. Proc., 12th Conf. on Coastal Eng., 1321-1340 (in Japanese).
- Park, S.K., Park, H.B., Hong, S.H. and Lee, G.S. (2016). The study on mitigation method of beach erosion using the geo-cells. A Proc. of Conf. on Ocean Eng., KSOE, 1, 145-148 (in Korean).
- Park, S.K., Park, H.B., Hong, S.H., Kwon, S.C. and Lee, K.S. (2016). Experimental study on effectiveness of the irregular wave reduction using the Geo cell. A Proc., of Conf. on Ocean Eng., KSOE, 1, 149-152 (in Korean).
- Sawaragi, T. and Iwata, K. (1974). On wave deformation after breaking, 15th Proc., Conf. on Coastal Eng., 481-498 (in Japanese).
- Rector, R.L. (1954). Laboratory study of equilibrium profile of beaches. Tech., Memo., 41, Beach Erosion Board, pp38.
- Sunamura, T. and Mizuno, O. (1987). A study on depositional shoreline forms behind an island. Ann., Rep., Inst., Geosci., Univ. Tsukuba, 13, 71-73 (in Japanese).
- Sunamura, T. (1975). Static relationships among beach slope sand size and wave properties. Geography Review, 48(7) (in Japanese).

Received 27 September, 2017

Revised 22 October, 2017

Accepted 27 October, 2017