

# 개비온의 피복효과를 고려한 해변침식특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Characteristics of Beach Erosion Considering Armoring Effect of Gabions

이성대\* · 이상영\*\* · 최혁진\*\*\* · 신영섭\*\*\*\*

Seong Dae Lee\*, Sang Young Lee\*\*, Hyuk Jin Choi\*\*\* and Young Seop Shin\*\*\*\*

**요지** : 최근 해수면상승이나 해상조건의 악화 등으로 인해 연안보존을 위한 해안구조물 수가 급격히 증가하고 있다. 해안구조물은 소실되거나 제거되어서는 안 된다는 조건에서 관련된 해안 생태계를 충족하면서 해안공학특성을 만족하도록 계획이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 사다리꼴 형태의 개비온블록을 개발하였으며 이동상 2차원 단면실험을 통해 타당성을 검토하였다. 실험은 8가지의 침식형 및 퇴적형 파랑에 대해 수행하였으며, 실험결과 개비온 블록이 해변단면의 침식을 억제하는 특성이 있음을 확인하였다. 새롭게 고안된 개비온 블록에 대한 실험결과 해변침식 대책공법의 대안으로 가능성이 있을 것으로 판단되었다.

**핵심용어** : 사다리꼴 개비온블록, 수리실험, 해변침식대책

**Abstract** : Number of coastal protection structures have been increased rapidly due to rising sea levels and deteriorated sea conditions. Coastal structures should be designed to meet coastal engineering requirements and ecosystem conditions, while they are not lost or removed. In this study, trapezoidal gabion block was developed for the purpose, and two-dimensional laboratory experiments were conducted to validate applicability of the block. The experiments were carried out with eight types of erosive and accretive wave conditions. As a result, it was confirmed that the gabion blocks have a feature of preventing erosion of beach. The newly designed gabion blocks could be an alternative as a countermeasure method for beach erosion.

**Keywords** : trapezoidal gabion block, hydraulic test, beach erosion countermeasure

### 1. 서 론

우리나라는 국토면적이 협소한 반면 해역별로 다양한 해안선을 보유하고 있으며, 연안해역의 고도이용을 목적으로 연안 정비 및 항만사업이 활발히 이루어져 오고 있다. 임해역에 건설되고 있는 항만시설, 해양관광 및 해안의 인프라 구축을 위한 연안 구조물 축조로 인해 지금까지 해안제방이나 호안에만 의존해 왔던 연안방재에 대한 근본적인 변화가 요구되고 있다. 우리나라 해안선은 동적안정의 파괴로 인한 해안제방의 붕괴, 항내매몰 및 해변 침식 등 다양한 형태의 연안재해가 나타나 사회문제화 되고 있다. 특히 해변(sand beach) 침식이 심각하며 해변은 외해에서 내습하는 파랑에너지를 적절히 감소하여 육지측으로 월파하는 에너지를 저감하고 반사파를 최소화하고 임해역의 해염(sea salt) 발생을 억제하는 기능을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그리고 해변은 육지

에서 방류되는 오염물질의 수질정화기능을 가지고 있어 생태계의 리빙필터(living filter) 역할로서 연안생태보전의 측면에서 그 가치가 인정되고 있는 실정이다. 또 친수성 및 경관의 측면에서도 해변이 가지고 있는 경제 사회적 가치는 매우 크다고 할 수 있다.

해빈침식은 표사침식으로 설명할 수 있으며 해안을 이루고 있는 표사의 주공급원인 하천의 모래가 이수 및 치수를 목적으로 건설된 댐, 하천보 등으로 차단되어 해안침식은 급속히 가속화 되고 있다. 이와같이 인위적 혹은 자연적 요인에 의한 해안 및 호안의 침식 등으로 해안선은 점차 후퇴하고 있어 인적·물적 피해가 지속적으로 나타나 사회문제로 대두되고 있는 실정이다(Yoon, 2004).

해빈침식현상은 다양한 원인에 의해 발생하며, 특히 우리나라는 해역별 지형적 특성이 뚜렷하고 해역에 따라 침식원인 또한 다양하게 나타나고 있다. 그리고 지구 온난화로 인

\*한라대학교 토목공학과(Corresponding author: Seong Dae Lee, Department of Civil Engineering, Halla University, 28 Halla university-gil, Wonju-si, Gangwon-do 26404, Korea, Tel: +82-33-760-1264, E-mail: sdlee@halla.ac.kr)

\*\* (주)지오시스템리서치(GeoSystem Research Corporation)

\*\*\* (주)해안해양기술(Coast and Ocean Technology Research Institute)

\*\*\*\* 한라대학교 메카트로닉스공학과(Department of Mechatronics Engineering, Halla University)

한 기후 변화로 해수면의 상승과 더불어 난개발에 따른 인위적 요인 등에 의해서 동적 안정 상태가 파괴된 해안 및 해안구조물의 침식 피해 사례는 점차 증가하고 있다. 해빈침식의 근본적인 원인은 모래 부족에 의해 나타나지만 침식방지 대책공법으로 적용·설치되고 있는 강성공법인 호안축조, 돌제, 이안제 등에 의해 오히려 해안침식 문제가 악화되거나 인근 해역으로 확대되는 경우가 수차례 보고된 바 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 요구되고 있다.

침식방지대책 공법으로는 표사이동 경로를 근원적으로 차단하여 침식을 억제하는 강성공법과 흐름을 부분적으로 차단하거나 손실된 모래를 보충하는 연성공법이 있다. 강성공법은 이안제, 돌제, 헤드랜드 및 잠제 등이 있으며 연성공법으로는 인공양빈, 모래강제이동(sand by pass), 지하수위저감법 및 인공식생을 사용하는 방법 등이 있다(Lee et al., 2009).

본 연구에서는 해빈침식 및 세굴대책의 한 방법으로 돌망태의 일종인 개비온(gabion)을 사용하였다. 돌망태 내부에 석재채움을 한 투과성이 양호한 개비온을 얇은 사다리꼴의 블록형태로 제작하고 이들을 연결·배치하여 이를 통해 해빈 및 해저지형을 안정화하는 것이다. 개비온 블록은 독립된 모형이지만 서로 연결이 가능하여 일체화되고, 개비온 연결부의 유연성으로 해빈 침식이나 세굴현상을 지연 또는 중지하도록 피복화 역할을 한다. 해빈의 표면이 투과성 개비온 블록으로 덮이게 되면, 표사 등의 토사는 블록 아래에서 되돌림류 및 저층반류(undertow) 등의 소류력으로 부터 안정화되는 것이다.

본 연구는 개비온 블록의 해저 및 해빈 안정화의 원리를 해빈침식이나 세굴 및 해저지형변동의 대책법으로 확장하여 적용하는 것이다. 특히 쇄파대 부근에서 발생하는 부유표사가 해안역(전빈대)으로 이동하면서 저층반류에 의해 경계층 내부로 대부분 제한이 되고, 외빈대에서도 이와 유사한 흐름이 나타나는 것으로 알려져 있다(Miyatake et al., 2013). 따라서, 개비온 블록을 해저지형 변동이 가장 극심하게 발생하는 포말대(swash zone)를 중심으로 쇄파대 전면까지 포설하여 해저에 장감화 현상을 발생시켜 되돌림류(return flow)를 최소화하여 해저지형을 안정화하거나 침식을 억제하여 회복(퇴적)하도록 하는 것이다.

개비온은 오래전부터 하천의 세굴방지공이나 사면안정 대책으로 널리 쓰이고 있으며(Heibaum, 2014; Park, 2013; Pagliara and Palermo, 2013; Yoon et al., 2003), 연안해역에서는 개비온으로 호안에 적용된 사례가 많이 있고(Nordstrom, 2014), 습지 및 맹그로브(Mangrove) 식생 복원을 위해 복원지 전면에 개비온 구조물을 설치하여 파랑을 저감하고 배후지에 표사 퇴적을 유도하여 식생의 복원력을 향상한 경우(Kamali and Hashim, 2011) 그리고 다양한 형태의 해빈 침식 및 연안 구조물에 의한 국부세굴 대책으로 적용되기도 한다(d'Angremond et al., 1992; Headland et al., 2007; Dette and Raudkivi, 1994; Yang et al., 2010; Temmerman et al., 2013). 또, 연안해역에서 지진해일 대책으로 적용되기도

하며(Sheel, 2014), 연안습지를 보호하기 위한 방안으로 적용되기도 하였으며(Doody, 2013) 최근에는 이안류의 저감방안으로 투과성 개비온체제를 적용하고자 하는 연구도 있으나(Lee et al., 2014) 이들은 대부분 직립 직육면체 형태의 개비온 체제를 적립하여 적용하기 때문에 입사파랑이 직접 내습하여 작용하는 경우에는 파손이나 붕괴 등과 같은 피해의 가능성이 있다. 실제로 2013년 인도양에서는 폭풍해일로 인해 1,640 m의 직립 개비온 호안이 파손된 사례도 보고되고 있다(The Times of India, 2013).

본 연구에서는 호안이나 해빈침식 대책으로 주로 후빈(back shore)역에 적용되고 있는 개비온을 전빈대나 해안선 부근에 적용하기 위한 사다리꼴 형상의 개비온 블록 형태를 제안하고 개비온 블록에 의한 해빈단면의 침퇴적 특성을 2차원 단면수리 실험을 통해 검토하여 해빈침식 대책법으로의 적용성 및 타당성을 파악한다.

## 2. 수리실험

### 2.1 실험조건

수리실험은 입사파 조건에 따른 해빈단면변화를 파악하기 위한 것으로 실험목적, 수조의 크기 및 상황 등을 고려하여 Froude 상사법칙을 적용한 1/20 축척모형으로 하였다.

조파수조는 규칙파 및 불규칙파의 생성이 가능하며, 규칙파의 조파방법은 유의파고와 이에 상응하는 유의파주기를 이용하여 파고 및 파장이 일정한 정현파 형태로 조파하였으며, 불규칙파는 Bretschneider에 제안된 스펙트럼을 Mitsuyasu에 의해 수정한 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼 사용하여 조파하였으며, 다음 식(1)과 같다.

$$S(f) = 0.205H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_s f)^4] \quad (1)$$

여기서,  $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도,  $f$ 는 주파수 그리고  $H_s$  및  $T_s$ 은 각각 유의파고 및 유의파주기를 나타낸다.

실험에 사용된 입사파랑의 제원은 Sunamura and Horikawa (1974)가 제안한 해빈지형 분류식 식(2)를 통하여 적용된 수심과 주기에 따른 침식형 및 퇴적형 파랑을 선정하고 예비실험을 통해 확정하였다. 실험에 사용한 입사파 조건은 Table 1에 나타낸 바와 같이 완전 침식이 나타날 것으로 판단되는 입사파고 12.0 cm 및 15.0 cm 에 대해, 주기 1.1초, 1.5초의 3개 침식형 파랑조건과 입사파고 10.0 cm, 주기 1.8 sec인 파랑조건 대하여 규칙파 및 불규칙파를 각각 적용하였다.

$$\frac{H_o}{L_o} = C_s (\tan\beta)^{-0.27} \left(\frac{d_{50}}{L_o}\right)^{0.67} \quad (2)$$

여기서,  $H_o$  = 입사파고,  $L_o$  = 입사파장,  $\tan\beta$  = 해저경사,  $d_{50}$  = 중앙입경,  $C_s$ 는 침식형과 퇴적형을 구분하는 무차원 정수이며, 실험실 수조에서  $8 \leq C_s$ 이면 완전침식(후퇴)을,  $4 \leq C_s \leq 8$ 이면 부분 침식 또는 퇴적을 그리고  $C_s \leq 4$ 은 완전퇴적을 나

**Table 1.** Experimental wave condition

Wave condition			
$H$ (m) <sup>(1)</sup>	$T$ (sec) <sup>(1)</sup>	Wave type	
0.15	1.10	Regular Irregular	Erosion
0.12	1.50	Regular Irregular	Partly erosion
0.15	1.50	Regular Irregular	Erosion
0.10	1.80	Regular Irregular	Deposition

\*윗첨자<sup>(1)</sup>은 불규칙파의 경우 유의파 정보를 의미함.

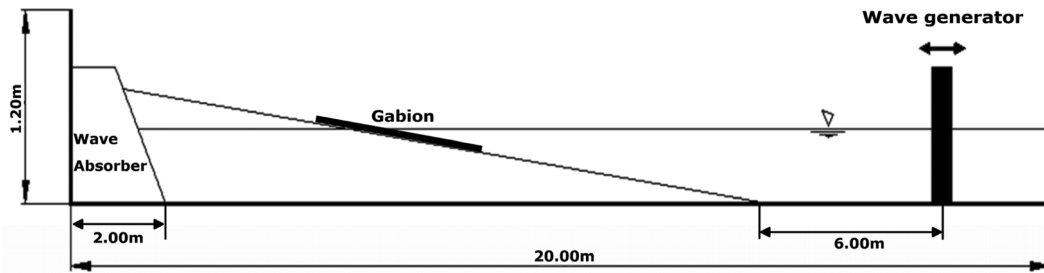
타낸다. 식(2)를 근거로 동일한 크기의 입경과 해저경사를 고려하면 입사파고  $H_0$ 가 크고, 주기가 짧아지면 즉  $C_r$ 가 증가하면 침식형 해빈 그리고  $C_r$ 가 감소하면 퇴적형 해빈을 형성하게 된다. 그러나 해빈분류식 식(2)에는 저질의 비중이 빠져있어, 본 연구에서는 상기 식을 근거로 예비실험을 통하여 침식형 및 퇴적형 파랑을 선정하였다. 선정된 실험안은 Table 1에 나타난 바와 같이 퇴적형 파랑에 대해 2개안(규칙파 및 불규칙파)과 침식형 및 부분 침식형파랑에 대해 6개안(규칙

파 및 불규칙파)으로 나누어 수행하였다.

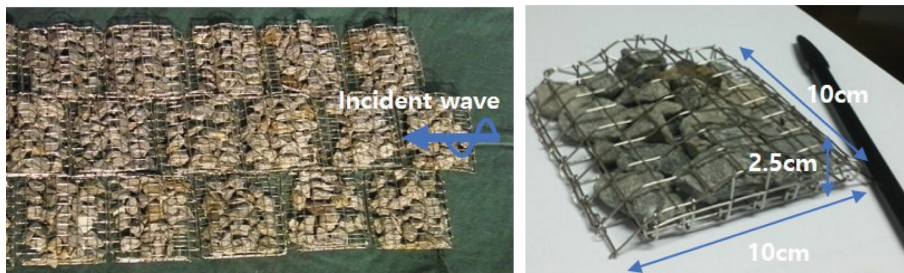
**2.2 실험방법**

실험에 사용된 수조는 Fig. 1에 도시한 바와 같은 길이 20 m, 폭 0.7 m, 깊이 1.25 m의 2차원 단면조파수조이다. 그리고 실험에 이용된 개비온 블록 모형은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 사다리꼴 형상으로 고안하였으며 기하학적 상사법칙이 일치되도록 제작하였다. 개비온 블록모형은 10 cm × 10 cm × 2.5 cm( $L \times B \times H$ )의 크기를 가진 투과성 체체를 사용하였으며, 지그재그형으로 연결·배치하여 해빈 및 지형의 변동실험에 사용하였다. 그리고 Fig. 3은 조파수조내 개비온 블록모형이 설치된 상태를 보이고 있다.

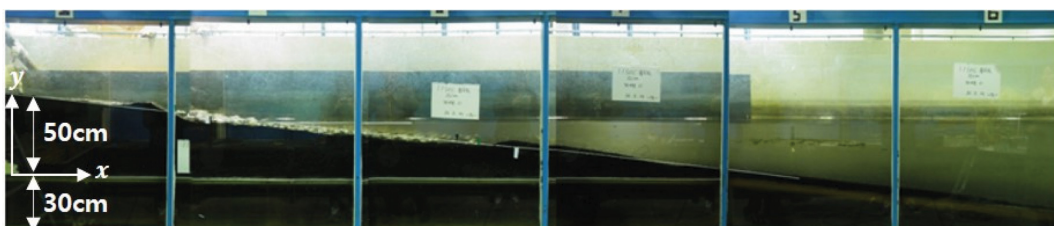
본 조파수조와 같이 제한된 길이의 수로를 통해 이동상 실험을 하는 경우 침식형 및 퇴적형 파랑의 재현이 필수적이다. 그리고 수로바닥경사는 쇄파발생위치, 파랑변형 및 구조물에 작용하는 파랑특성과 직접 관련되어 있으므로 본 실험에서는 2차원수로에서의 효과적인 실험파랑의 유도를 피하기 위해 조파관에서 5.0 m까지 수평상태를 유지하다가 그 이후에 수로바닥 경사를 1/10 로 재현하였다. 저면바닥은 이동상재료의 안정을 위해 아연강판으로 측벽과 완전 일체하여 제작하였으



**Fig. 1.** Cross section of wave flume.



**Fig. 2.** Arrangement and gabion block model used in hydraulic experiment.



**Fig. 3.** Hydraulic test with gabions.

며, 저면바닥의 상부에 이동상 모형사(저질)를 포설하였다. 이동상 실험에서는 이동상 재료의 선택이 매우 중요한 요소이다. 수리모형 실험시 원형을 모형화하기 위해 과량제원, 길이, 부피, 시간, 무게 등은 상사법칙을 통해 축척이 가능하지만 이동상 재료는 저질에 대한 축척 문제가 이동상 실험에서 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 이러한 이유로 표사의 이동 특성 중에서 소류사의 축척 관점에서 적합하다고 판단되는 상수도 처리의 여과제로 사용하는 활성탄의 일종인 안쓰라사이트(Anthracite)를 사용하였다. Hughes(1993)는 소류사 및 부유사 이동상 실험에 대한 비점착성 모형사에 대한 연구를 통해 이동상 축척에 관한 차원해석 결과 소류사가 지배하는 이동상 모형인 경우를 Best Model(BM), Light Weight Model(LWM), Densimetric Froude Model(DFM), Sand Model(SM) 등으로 분류하였다. 이를 통해 점성효과가 큰 해역에서는 Best Model(BM)이 적합하며, 해안구조물 주변의 소류사 이동해역에는 Light Weight Model(LWM), 점성효과 및 해안구조물 주변의 소류사 이동이 동시에 작용하는 해역에서는 DFM 그리고 원형에서 이동상 변동이 거의 없거나 미소한 경우에 동일한 비중의 재료를 적용하도록 한 SM(Sand Model)이 적합함을 제시하였다. 본 이동상 모형실험은 포말대(swash zone)나 전빈대의 소류사가 지배하는 영역을 대상으로 해빈침식 및 표사이동 특성을 검토하는 것이므로 Lightweight Tracer Model(LWM)을 적용하였다. LWM에 의해 비중 2.65, 중앙입경  $d_{50} = 0.20$  mm인 모래의 1/20 축척인 경우 이동상 모형사 비중  $S = 1.70$ ,  $d_{50} = 0.26$  mm의 재료가 적합하다(Hughes, 1993). 이를 토대로 본 수리실험에 적합한 이동상 재료를 얻기가 어려우므로 본 연구에서는 비중은  $S = 1.20$ ,  $d_{50} = 1.00$  mm인 안쓰라사이트를 모형사로 선정하여 사용하였다. 모형사는 Fig. 3에서 보듯이  $x = 0$  위치에서 수평판상에 50 cm를 포설하여 1/10 경사로 설치하였다.

수리실험은 일정경사 해빈의 침식 및 세굴 현상에 대해 수행하였으며, 조파관 부근에서 수심( $h$ )을 0.65 m로 고정하였다. 실험에 사용한 입사파 조건은 전술한 바와 같이 침식형 및 퇴적형 파랑에 대해 규칙파와 불규칙파를 적용하였다.

실험 안별 해빈단면변화의 분석을 위해 조파시간은 예비실험을 통해 해빈 단면의 변화가 충분히 안정되는 것으로 확인된 60분을 적용하였다. 그리고 침식 및 퇴적 되어진 상태의 해빈 상에 개비온 블록을 설치하였는데 침식 및 세굴이 이루어진 해안선 부근에서 연안사주(sand bar)가 나타난 부근까지 길이 1.60 m에 거치하였다. 그리고 거치된 상태에서 동일한 파랑을 1시간 동안 재조파하여 해저지형변동 특성을 관측하였다. 일반적으로 이동상실험에서 단면변동 측정은 (1) 측면에서 사진측정을 통하거나 (2) 단면 중앙부에 레이저 사면측정기를 통해 추출하는 방법이 있다. 측면 측정법은 촬영된 사진의 왜곡 보정을 통해 얻을 수 있지만, 측벽경계효과에 의해 실제와 다른 결과가 나타날 수 있다. 그리고 단면 중앙부

의 측정은 레이저 사면측정기를 사용하는 경우 조파수로에 물을 배수해야만 지형을 측정할 수 있는데, 본 실험과 같이 비중이 작은 재료를 사용하는 경우 배수 과정에서 지형변동이 생기는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 측면 사진측정을 통해 개비온 모형에 의한 해빈안정화 특성을 관측하였다.

개비온 블록의 해빈 안정의 기본 원리는 해저 피복화를 통해 해빈의 침식과 세굴을 억제하는 것이다. 해빈에서의 표사 이동 및 지형변동의 주요한 원인은 여러 가지 원인이 있으나 쇄파에 의해 발생하는 부유사가 흐름에 의해 전빈대 및 포말대로 소류사 형태로 이동하거나, 외빈대에서는 저층반류에 의해 이동한계수심까지 나아가거나, 해빈류에 의한 소류사 이동으로 알려져 있다(Hoefel and Elgar, 2003). 따라서, 개비온 블록을 해저지형 변동이 가장 극심하게 발생하는 포말대와 전빈대를 중심으로 쇄파대 전면까지 포설하여 해저에서 장갑화 현상을 발생시켜 저층반류 및 소류력을 최소화하여 표사이동에 의한 침식/세굴을 최소화 하거나 회복(퇴적)하도록 유도하는 것이다.

지금까지 해빈침식이나 세굴 문제의 대책법으로 해저 피복화를 유도하기 위해 개비온이나 개비온 블록을 통해 연구한 사례는 거의 없다. 개비온이 투과성 구조물이므로 후빈대 호안(sea wall)에 설치하여 파랑에 의한 되돌림류를 저감하여 이에 따른 국부세굴 방지를 위해 직육면체모양의 개비온 구조물을 적용하는 사례는 있으나(Ostrowski and Szymkiewicz, 2008) 전빈역의 포말대에 적용한 사례는 없다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 침식형 파랑( $H_s = 15.0$ cm, $T_s = 1.10$ sec)

1/10의 초기 일정사면 해빈단면에  $H = 15.0$  cm,  $T = 1.10$  sec의 규칙파 및 불규칙 실험파랑을 1시간 조파한 경우 해빈 단면 변동 특성을 Fig. 4에 도시하였다. 규칙파 및 불규칙파랑의 조파결과 전형적인 침식형 해빈단면의 특성을 보여주고 있다.

Fig. 4(a)는 규칙파의 실험결과를 나타내며 침식이 되어 회복이 어려운 해빈을 대상으로 했기 때문에 60분 조파하여 침식상태를 만든 이후 개비온을 설치하여 실험을 했다. 그림에서 점선은 일정사면에 1시간 규칙파를 조파한 결과이며 실선은 1시간 조파하여 침식된 해빈단면상에 개비온 블록을 침식이 발생한 해안선에서 사주(sand bar)가 발생한 부근까지 1.60 m 전빈부 측(외해측)으로 설치한 다음 1시간 연속 재조파한 해빈단면 결과를 나타내었다.

초기경사 1:10 사면에 파랑을 1시간 동안 조파한 점선의 결과는 초기 해안선이 위치한  $x = 154$  cm 위치에서 1시간 경과 후 110 cm로 44 cm 후퇴하고 있으며 침식의 범위는  $x = 92 \sim 304$  cm에 걸쳐 나타나고 있으며 연직방향으로는 해안선( $x = 154$  cm) 및  $x = 280$  cm의 위치에서 최대  $y = 7.0$  cm 정도 침식 및 세굴이 나타나고 있다. 그리고  $x = 400$  cm 범위까지 사

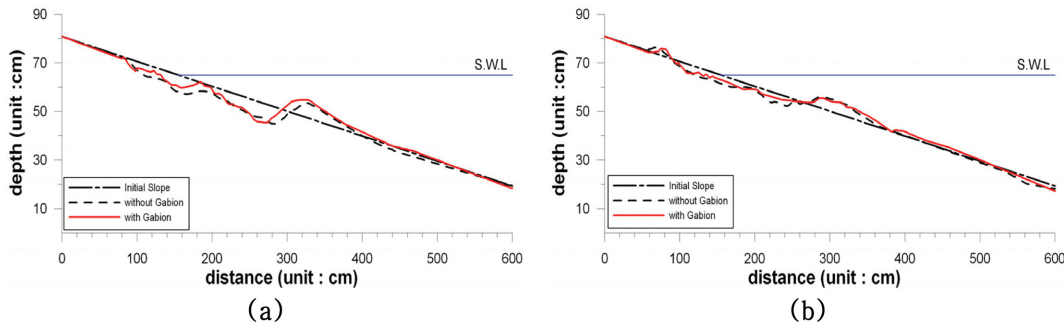


Fig. 4. Beach deformation with wave condition  $H = 15.0$  cm,  $T = 1.10$  sec.

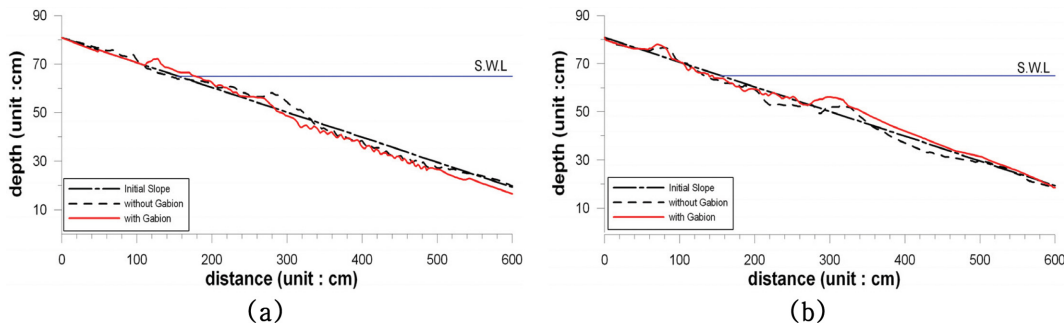


Fig. 5. Beach deformation with wave condition  $H = 12.0$  cm,  $T = 1.50$  sec.

주가 발생하는 전형적인 침식형 해빈단면을 나타내고 있다.

이 상태에서  $x = 95$  cm부터 255 cm까지  $x$  방향으로 160 cm에 개비온 블록을 설치한 다음 동일한 파랑을 1시간 조파 하였으며 그 결과 전체적으로는 개비온 블록 설치전 상태와 유사한 해빈특성을 보이고 있으나, 침식의 크기와 범위가 감소하는 특성을 보이고 있다. 그리고 사주 바깥측 외빈대에서 전체적으로 퇴적의 경향을 보이고 있다. 즉, 정선의 측면에서 보면 후퇴된 정선은  $x = 110$  cm에서 132 cm로 정선이 22 cm 전진되고 있음을 알 수 있다. 그리고 침식의 범위도  $x = 304$  cm에서 292 cm로 해안측으로 12 cm 전진하며 연직방향으로도 2~3 cm 정도 상승(퇴적)하는 경향을 보이고 있다. 따라서 개비온 블록이 없는 상태에 비해 전빈대에서 해빈 침식이 더 이상 나타나지 않거나 해빈이 안정 상태인 것으로 판단된다.

불규칙파에 대한 실험결과는 Fig. 4(b)에 도시하였으며, 일정사면에 불규칙파랑을 조파한 결과 규칙파와 비슷한 침식형 해빈변동 특성을 보이고 있다. 다만 그 크기와 범위가 규칙파에 비해 축소되어 나타나고 있으며 이는 불규칙파의 특성상 쇄파점이 상대적으로 넓은 영역에서 발생하기 때문으로 판단된다. 점선의 결과에서 초기정선  $x = 154$  cm에서 후퇴하여  $x = 70$  cm 부근에서 소규모 모래턱(berm)이 나타나고 있으며 모래턱의 최대 높이는 초기상태에 비해 연직방향으로  $y = +2.4$  cm 상승하며 전체적으로 전빈대에서 침식이 일어나고 쇄파대 외측에 연안사주가 나타나는 전형적인 침식형 해빈특성을 보이고 있다. 즉 초기정선은  $x = 154$  cm에서 118 cm로 36 cm 정도 후퇴하고 있으며 전빈대의 침식 크기와 범위가

는 규칙파와 거의 유사한 특성을 보이고 있다. 침식은 정선에서  $x = 294$  cm까지 나타나며, 그 이후에는 사주가 나타나  $x = 400$  cm 부근까지 이어지며 최대 사주높이는  $x = 300$  cm 부근에서  $y = +5.2$  cm 상승하고 있다.

침식된 상태에서 개비온 블록을  $x = 95$  cm에서 255 cm까지 설치하여 1시간 조파한 결과는 Fig. 4(b)에 나타내었다. 실험결과는 개비온 블록 설치전과 전체적으로 유사한 해빈 변동 결과를 보이고 있다. 즉, 포말대에서 모래턱이 형성되며, 전빈대에서 침식이 나타나고 외해측에는 연안사주가 형성되는 특성을 보이고 있으나, 규칙파의 경우와 유사하게 침식범위와 크기가 감소하고 있으며 연직방향의 침식깊이가 전빈대 부근에서 2~3 cm 정도 감소되며, 특히 정선이  $x = 118$  cm에서 134 cm 위치로 전진하고 있어 개비온 블록의 설치에 따라 침식 및 세굴의 진행이 제한되거나 부분적인 퇴적이 나타나고 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 침식형 파랑 [ $H_s = 12.0$ cm, $T_s = 1.50$ sec]

$H = 12.0$  cm,  $T = 1.50$  sec의 규칙파 및 불규칙 파랑을 1시간 조파한 경우 해빈단면 변동 특성은 Fig. 5(a) 및 (b)에 각각 나타내었다.

실험파랑은 Sunamura and Horikawa(1974)의 해빈지형 분류식에 의하면 부분침식/퇴적이 발생하는 파랑으로 예측되었으며 실험결과에서 알 수 있듯이 이같은 특성을 보이고 있다. Fig. 5(a)에 규칙파에 대한 실험결과를 도시하였으며 일정사면에 1시간 조파한 경우 대체로 안정한 해빈특성을 보이고 있으며 초기정선이  $x = 154$  cm에서 144 cm로 후퇴하지만

전체적으로 초기상태를 거의 유지하는 것으로 판단된다. 그리고 전빈대에서 퇴적이 나타나고 있으며,  $x = 334 \text{ cm}$  이후부터는 완만한 침식을 보이고 있다. 연직방향으로는  $y = 1.5 \sim 2.0 \text{ cm}$  정도의 침식이 사륜(sand ripples)형태로 이어지고 있어 전체적으로 안정해빈 또는 부분퇴적형 해빈 상태를 보이고 있다.

이 상태에서  $x = 100 \text{ cm}$ 에서  $260 \text{ cm}$ 까지 개비온블록을 설치하고 다시 동일한 규칙파를 1시간 조파한 결과는 실선으로 도시하였다. 그림에서 보듯이  $x = 260 \sim 330 \text{ cm}$  부근에 최대 연직퇴적고  $6.0 \text{ cm}$ 인 사주가 사라지고 정선측으로 이동해가는 특성을 보이고 있다. 결과적으로 정선이  $144 \text{ cm}$ 에서  $178 \text{ cm}$ 로  $34 \text{ cm}$  전진하고 있어, 정선의 측면에서는 침식형이 퇴적형으로 변하는 특성을 보아고 있으며, 정선에서  $x = 280 \text{ cm}$ 까지 연직방향으로  $y = 2 \sim 3 \text{ cm}$  정도로 넓게 퇴적이 나타나고 있다. 즉 개비온 블록 설치후 개비온 외측에 있던 표사가 해안측으로 이동해가는 퇴적형 해빈으로 변해가는 특성을 보이고 있다.

불규칙파에 대한 실험결과는 Fig. 5(b)에 도시하였으며, 일 정사면상에 불규칙파랑을 조파한 결과 규칙파와 다른 해빈변동 특성을 보이고 있다. 즉 규칙파에서는 부분적으로 안정한 해빈을 보였으나 불규칙파의 경우에는 부분 침식의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 소규모 모래턱이  $x = 50 \sim 100 \text{ cm}$  부근에서 발생하며 최대 모래턱높이는  $5.5 \text{ cm}$  정도로 나타나고 있다. 그리고 정선에서  $x = 292 \text{ cm}$ 까지 침식이 나타나고 있으며 이후  $x = 350 \text{ cm}$ 까지는 사주가 형성되고 다시 완만한 침식을 보이고 있다. 사주의 최대높이는  $x = 320 \text{ cm}$ 에서  $y = 4.2 \text{ cm}$  상승하며, 전빈대의 침식은  $x = 220 \text{ cm}$ 에서 최대 침식깊이  $y = 5.5 \text{ cm}$ 로 나타났다. 이 상태에서 개비온 블록을  $x = 135 \text{ cm}$ 에서부터 설치하였으며 이는 정선의 위치가  $x = 154 \text{ cm}$ 에서  $132 \text{ cm}$ 로 후퇴하였기 때문이다. 실험결과 모래턱의 크기와 범위는 개비온 설치전의 실험결과와 동일하였으며 정선은  $x = 132 \text{ cm}$ 에서  $140 \text{ cm}$ 로 전진하여 큰 차이는 보이지 않고 있으나 전빈대부근에서 연직방향으로 표사가  $1 \text{ cm}$ 이상 상승하고 있다. 특히 침식이 다소 크게 나타났던  $x = 200 \sim 290 \text{ cm}$  부근에서 초기 해빈상태로 회복해 가는 경향을 보이고 있다. 특히 연안사주의 형태도 현상태에는  $x =$

$294 \text{ cm}$ 부터 시작된 것이 개비온 블록을 설치한 이후에는  $x = 274 \text{ cm}$ 부터 시작되어  $310 \text{ cm}$  부근에서 최대 사주높이  $y = 6.6 \text{ cm}$ 로 나타났으며, 이같은 퇴적의 경향은 실험측정 영역인  $x = 600 \text{ cm}$ 까지 이어지고 있다. 이것은 외측에서 지속적으로 전빈대 및 정선부측으로 표사가 이동하는 전형적인 퇴적형 해빈의 특성을 보여주고 있다.

### 3.3 침식형 파랑 [ $H_s = 15.0 \text{ cm}$ , $T_s = 1.50 \text{ sec}$ ]

$H = 15.0 \text{ cm}$ ,  $T = 1.50 \text{ sec}$ 의 파랑을 조파한 경우의 해빈단면 변동 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

규칙파에 대한 실험결과는 Fig. 6(a)에 나타내었으며 전체적으로 침식형 해빈단면의 특성을 보여주고 있다. 정선은  $x = 154 \text{ cm}$ 에서  $127 \text{ cm}$ 로  $27 \text{ cm}$  후퇴하고 있으며 침식의 크기와 범위는  $x = 94 \sim 250 \text{ cm}$ 이며 연직방향으로  $x = 200 \text{ cm}$ 에서 최대 침식깊이가  $y = 6.5 \text{ cm}$ 로 나타나고 있고  $x = 300 \sim 380 \text{ cm}$ 의 범위에서 사주가 발생하는 특성을 보이고 있으며 그 이후는 완만한 침식의 형태를 나타내고 있다.

침식된 해빈상에 개비온 블록을  $x = 95 \sim 255 \text{ cm}$ 에 설치하였으며 실험 결과는 Fig. 6(a)의 실선으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 안정 또는 퇴적형 해빈으로 나타나고 있으며 정선 또한  $127 \text{ cm}$ 에서  $150 \text{ cm}$ 로 전진하여 초기 정선상태로 회복되어 가는 특성을 보이고 있다. 특히 전빈대에서 퇴적이  $x = 220 \sim 380 \text{ cm}$ 의 범위에 걸쳐 넓게 나타나고 있으며  $x = 440 \text{ cm}$  이후에는 완만한 침식의 특성을 보이고 있다. 즉 외해측에서의 지속적인 표사 공급을 통해 전체 해빈이 안정 또는 퇴적의 특성을 보이는 것으로 판단된다.

불규칙파의 실험결과는 Fig. 6(b)에 나타내었으며, 개비온이 없는 상태에서 소규모의 모래턱이  $x = 70 \sim 90 \text{ cm}$ 의 부근에 나타나고 있고, 정선의 후퇴와 전빈대 침식 그리고 쇄파대 바깥쪽에서 사주가 형성되는 것들을 판단하면 전체적으로 침식형 해빈특성을 보여주고 있다.

즉, 정선은  $x = 154 \text{ cm}$ 에서  $122 \text{ cm}$ 로  $32 \text{ cm}$  후퇴하고 있으며, 정선 전면에 모래턱이 나타나며 최대 모래턱높이는  $x = 86 \text{ cm}$ 에서 초기바닥에 비해  $y = +5.2 \text{ cm}$ 로 나타났다. 전빈대의 침식 범위와 크기는 규칙파 실험 결과와 대체로 유사하며  $x = 100 \sim 250 \text{ cm}$ 의 범위에 연직방향으로 평균  $y = 5.0 \text{ cm}$

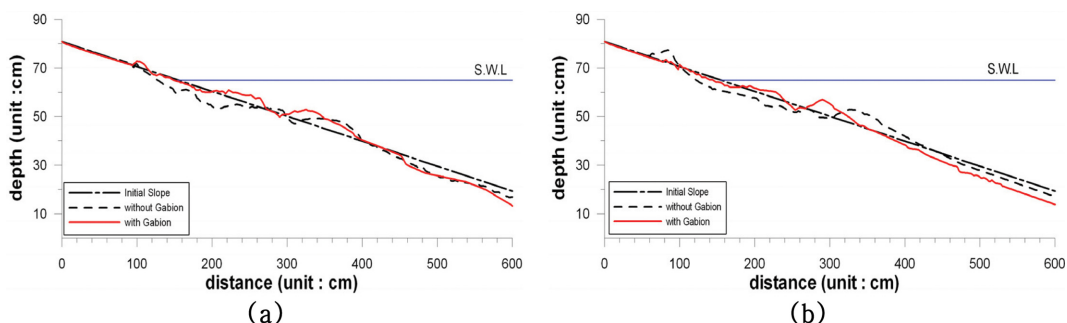


Fig. 6. Beach deformation with wave condition  $H = 15.0 \text{ cm}$ ,  $T = 1.50 \text{ sec}$ .

정도의 침식이 나타나고 있다. 그리고  $x = 300\sim 420$  cm의 범위에서 사주가 발생하고 이후에는 초기해빈 단면과 유사하지만 전체적으로 완만한 침식의 형태를 보이고 있다.

개비온 블록을 침식이 발생하기 시작한  $x = 100\sim 250$  cm의 전빈대에 설치하여 불규칙 파랑을 조파한 결과는 Fig. 6(b)에 실선으로 나타내었으며, 전체적으로는 개비온이 없는 상태의 결과와 유사하게 나타났으며, 규칙파의 실험결과와 같이 침식의 크기와 깊이가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 즉 정선의 경우  $x = 132$  cm로 나타나  $x = 122$  cm에서 10 cm 전진하고 있음을 보이고 있다. 초기정선( $x = 154$  cm) 부근에서 발생했던 세굴깊이  $y = 4.5$  cm가 개비온 블록 설치후에는 1.4 cm로 나타나 연직방향으로의 표사침식이 점차 완화되고 있음을 보이고 있다. 그리고 침식의 범위 또한 규칙파의 결과와 유사한 특징을 보이고 있으나 개비온 블록을 설치한 경우 연직방향으로 침식깊이가 점차 축소되어 가는 특성을 보이고 있다. 그리고 개비온 블록을 설치함에 따라 전빈대 부근에서 2~3 cm 세굴깊이가 축소되어 전체적으로는 퇴적이 되어 개비온 설치에 따른 영향으로 판단된다. 그리고 침식이나 세굴은 더 이상 나타나지 않고 있는 것으로 보인다.

### 3.4 퇴적형 파랑 [ $H_s = 10.0$ cm, $T_s = 1.80$ sec]

일정사면의 해빈단면에  $H = 10.0$  cm,  $T = 1.80$  sec의 퇴적형 파랑을 1시간 조파한 경우의 해빈단면 변동 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

실험파랑은 Sunamura and Horikawa(1974)의 해빈분류식으로부터 완전퇴적이 발생하는 파랑으로 선정되었으며 실험결과 퇴적형 해빈의 특성을 보이고 있다. Fig. 7(a)에서는 규칙파의 실험결과를 도시하였으며 그림의 점선에서 알 수 있듯이 전체적으로 퇴적형(계단형) 해빈 특성을 보여주고 있다. 즉 초기정선은  $x = 154$  cm에서 186 cm로 32 cm 전진하고 있으며, 연직방향으로는  $x = 138$  cm 위치에서 초기상태에 비해  $y = +8.5$  cm 상승하여 퇴적되는 특성을 보이고 있다.

그리고 정선부 및 전빈대에서 퇴적이  $x = 106\sim 274$  cm까지 나타나고 있다. 이같은 퇴적현상은 쇄파대에 해당하는  $x = 274\sim 404$  cm 범위에서 나타나는 넓은 범위의 침식에 의한 표사가 전빈대 및 정선부로 이동한 원인으로 판단된다. 쇄파대

부근의 침식은  $x = 314$  cm에서 최대 침식깊이 7.1 cm가 나타나며 그 이후  $x = 600$  cm까지 1~2 cm 정도의 침식이 넓은 범위에 걸쳐 완만히 나타나는 특성을 보이고 있다.

이 상태에서 개비온 블록을 초기 정선  $x = 155\sim 315$  cm까지 160 cm를 설치하여 규칙파를 조파하였으며 그 결과 침식구간이 거의 없이 전체적으로 퇴적형으로 나타났다. 즉  $x = 62\sim 314$  cm 범위에서 퇴적이 나타나고 있으며 이때  $x = 134$  cm에서 y 방향으로 +10.8 cm의 최대 퇴적고가 나타나고 있다. 그리고  $x = 316\sim 362$  cm까지 부분적으로 침식이 나타나고 있으며 이때  $x = 342$  cm 부근에서 최대 침식깊이가 0.9 cm 나타나 침식의 크기와 범위가 매우 축소되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고  $x = 362$  cm에서  $x = 600$  cm까지는 퇴적이 되고 있는 바 이는  $x = 600$  cm 외측에서 지속적으로 표사가 전진하여 이동하고 있기 때문이며 이는 전형적인 퇴적형 해빈의 특성이다.

퇴적형 해빈의 불규칙파의 실험결과는 Fig. 7(b)에 나타내었으며, 개비온이 없는 상태에서 전체적으로 안정상태의 퇴적형 해빈 특성을 보여주고 있다. 즉,  $x = 110$  cm 부근에서 모래턱을 형성하며 최대 모래턱높이는  $x = 104$  cm에서 초기 단면에 비해 +6.9 cm 퇴적되어 나타나고 있으며 정선 또한 초기정선  $x = 154$  cm에서 178 cm로 24 cm 전진·퇴적하고 있다. 그리고 전체 해빈단면에 걸쳐 퇴적이 일어나고 있으며 특히  $x = 540\sim 590$  cm 위치에서는 평균 퇴적높이가 5~6 cm 정도로 나타나고 있다. 본 실험결과 사주의 발생은 나타나지 않고 있다. 이 상태에서 개비온 블록을  $x = 155$  cm에서 315 cm까지 설치하였으며 이 결과는 Fig. 7(b)의 실선으로 나타내었다. 개비온이 설치되지 않은 상태(점선)의 결과와 비교하여 유사한 결과를 보이고 있으나 전체적으로 퇴적의 크기와 범위가 증가하는 특성을 보이고 있다. 모래턱은 현상태에 비해 전진하고 있으며 최대 모래턱의 발생위치 또한  $x = 104$  cm에서 120 cm로 이동하고 있다. 이에 반해 정선의 위치는  $x = 178$  cm에서  $x = 166$  cm로 12 cm 정도 후퇴하는 특성을 보여주고 있다. 그리고  $x = 290\sim 500$  cm까지에는 개비온 없는 상태에 비해 5~6 mm 이상 퇴적이 지속적으로 나타나고 있으나  $x = 500$  cm 이후에서는 상대적으로 퇴적의 크기가 감소하고 있는 바 이는  $x = 500$  cm 외해측에서 지속적으로 전빈대측으로

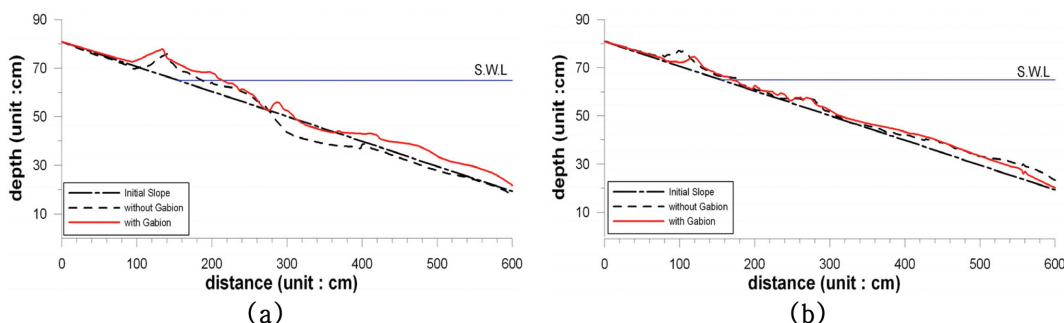


Fig. 7. Beach deformation with wave condition  $H = 10.0$  cm,  $T = 1.80$  sec.

표사가 이동하고 있는 것으로 설명할 수 있다. 이같은 경향은  $x = 600 \text{ cm}$  외측도 연안사주 및 쇄파대 바깥부(외빈대)이지만 표사가 전빈대 측으로 유입되는 전형적인 퇴적형 해빈의 특성을 보여주고 있다.

#### 4. 실험결과 및 토의

본 연구에서는 침식이 발생하는 해빈 상에 투과성 개비온 블록을 설치하여 발생하는 해빈지형 변화 특성을 수리실험을 통해 검토하였다. 개비온 블록은 군집시켜 설치하므로 설치영역 내에서 저면 피복을 통한 지반 안정화를 이끌어 낼 수 있고, 구조물 내부의 사석제 혹은 구조체는 되돌림류 및 저층반류를 저감시켜 저면의 안정을 이끈다. 이는 침식 및 세굴을 저감시키거나 퇴적발생을 유도하도록 제안한 것이다.

이같은 개비온 블록의 해저 및 해빈 안정화의 원리를 해빈 침식이나 세굴 및 해저지형변동의 대책법으로 확장하였으며, 특히 쇄파대 부근의 부유표사가 해안역(전빈대)으로 이동하면서 저층반류에 의해 경계층 내측으로 제한이 되고, 외빈대에서도 이와 유사한 흐름이 표사 이동한계수심까지 이어지고 있음을 알 수 있다. 따라서, 개비온 블록을 해저지형 변동이 가장 극심하게 발생하는 포말대(swash zone) 및 전빈대를 중심으로 쇄파대 전면까지 포설하여 해저에서 장갑화 현상을 발생시켜 되돌림류(return flow)를 최소화하여 해저지형을 안정화하거나 회복(퇴적)하도록 하는 것이다.

침식형 파랑에 대한 실험은 극심한 침식형 및 부분 침식형 해빈으로 나누어 볼 수 있으며 극심한 파랑( $H_s = 15.0 \text{ cm}$ ,  $T_s = 1.10 \text{ sec}$ )에 대한 실험 결과 침식이 중단되거나 안정화되는 특성을 보이고 있으며 해안선의 전진(퇴적)이 부분적으로 나타나고 있음을 확인하였다. 특히 불규칙파랑의 경우 규칙파의 실험결과에 비해 침식의 규모나 범위가 작아지는 경향을 보이고 있는 바 이는 불규칙파의 특성상 쇄파점이 상대적으로 넓은 영역에서 발생하기 때문으로 판단되며 규칙파의 결과와 전체적으로 유사하나 외해측으로 부터 표사 유입이 전빈대 측으로 지속적으로 나타나고 있어 부분적으로는 퇴적형 해빈으로 이송되어가는 특성을 보이고 있다. 이같은 이유는 해저바닥의 안정화 및 개비온 블록의 거친표면 조도의 효과에 의해 표사가 블록사이에 갇히거나 투과성 블록 내부의 폐쇄적인 공간 내에서만 이동하므로 전체적인 침식형 해빈의 특성이 완화되거나 안정 또는 부분적인 퇴적형 해빈으로 전환되는 것으로 판단된다. 또한 침식의 중요한 요인으로 제시되고 있는 쇄파대 내 지하수 흐름의 특성이 변동하는 것으로 보여지고 있으나 여기에 대해서는 쇄파대 내에서의 개비온블록 설치에 따른 지하유속 측정이나 예측에 따른 검토가 요구된다(Kakinuma et al., 2009).

부분 침식형 파랑인 경우( $H_s = 12.0 \text{ cm}$ ,  $15.0 \text{ cm}$   $T_s = 1.50 \text{ sec}$ ), 개비온 블록의 설치에 따라 연안사주 바깥쪽 표사가 시간 경과에 따라 전빈대 및 해안측으로 이동해가는 특성을 보

이며 이에 따라 부분 침식형 해빈이 부분 퇴적형 해빈으로 전이되어 가는 특성을 보이고 있다. 그리고 규칙파 및 불규칙파에 대해서도 매우 비슷한 특성을 보이고 있으며 침식형 해빈이 개비온 블록을 설치한 후에는 침식의 크기 및 범위가 완만히 감소하고 정선의 전진이 뚜렷히 나타나는 특성을 보이고 있다. 이의 원인 또한 완전침식형 해빈과 유사한 것으로 판단되며, 개비온 블록 내부 및 블록사이의 공간을 표사가 채우고 나면 외해측으로의 저층반류나 되돌림류가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

그리고 퇴적형 파랑( $H_s = 10.0 \text{ cm}$ ,  $T_s = 1.80 \text{ sec}$ )인 경우에는 파랑의 조파에 따라 퇴적형 해빈의 특성을 잘 보여주고 있으며 개비온 블록의 설치에 따라 퇴적이 지속적으로 증가하고 있는 결과를 보이고 있다. 이 경향은 불규칙파랑의 경우에 대해서도 동일하다. 퇴적의 크기와 범위가 개비온 블록 설치 전에 비해 증가하고 있는 특성을 보이고 있으며 이는 외해측에서 지속적으로 전빈대 및 해안선 부근으로 표사가 유입하는 전형적인 퇴적형 해빈의 특성이다. 이의 원인 또한 전술한 바와 같이 개비온 블록에 의해 해빈 단면이 안정화되고 블록 사이의 공간내에 표사가 채워지면서 블록내부와 표사가 일체화 됨으로서 지속적인 퇴적 및 정선의 전진이 일어나는 것으로 파악되었다.

수리실험을 통한 개비온 블록의 해빈침식 제어를 위해서는 쇄파대 및 전빈대의 연직 및 수평방향 유속분포의 변동특성을 검토해야 하며, 이를 통해 흐름과 표사이동의 관계를 명확히 할 필요가 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 해빈침식방지 대책으로 직육면체 형태를 변형한 사다리꼴 형태의 개비온 블록을 통해 파랑제어 효과 및 해안 침식 방지 제어 특성을 단면 수리실험을 통해 검토하였으며, 이동상 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 투과성 제제인 사다리꼴 형태의 개비온 블록을 개발하였으며 이동상 수리실험을 통해 해빈침식 및 세굴 현상을 제어하고 특히 침식형을 퇴적형 해빈으로 변화시키는등 해빈 침식 제어 및 대책법으로서의 가능성을 확인하였다. 이것은 개비온 블록 설치에 따른 해저 장갑화 효과에 의해 얻어지는 것으로 판단된다.
- 실험결과 특정한 파랑에 대해 침식형 해빈이 퇴적형으로 변화하는 경우가 나타났으며 특히 연안사주(sand bar)가 전빈대로 이동하는 등의 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 개비온블록의 해빈 안정화 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 본 실험의 신뢰성 확보를 위해 보다 실제에 근접한 모형을 선정하거나, 다양한 입사파 조건 및 개비온 블록의 크기에 따른 검증이 필요할 것으로 판단되며, 쇄파대내 유속측정을 통한 개비온 블록 설치에 따른 흐름 변동특성을 검토할 필요가 있는 바 이에 관해서는 추후의 연구과제로 남긴다.



## 감사의 글

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안재해 방지를 위한 흐름 및 파랑저감형 2중월류식 인공리프 개발).

## References

- d'Angremond, K., van den Berg, E.J.F. and de Jager, J.H. (1992). Use and Behavior of Gabions in Coastal Protection, Proc. 13<sup>rd</sup> ICCE, ASCE, 1748-1757.
- Dette, H.-H. Raudkivi, A.J. (1994). Beach Nourishment and Dune Protection, Proc of 24th ICCE, ASCE, 1934-1945.
- Doody, J.P. (2013). Coastal squeeze and managed realignment in southeast England. *Ocean & Coastal Management*, 79, 34-41.
- Ham, K., Kim, J. and Jang, D. (2002). An investigation study on the erosion at Hak-Dong gravel beach. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14(1), 65-75 (in Korean).
- Headland, J.R., Alfageme, S., Smith, E. and Kotulak, P. (2007). Coastal structure design for beach protection and sand retention. *Proc. Coastal Sediments*, ASCE, 2432-2445.
- Heibaum, M. (2014). Geosynthetics for waterways and flood protection structures, Controlling the interaction of water and soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(4), 374-393.
- Hoefel, F. and Elgar, S. (2003). Wave induced sediment transport and sandbar migration. *Science*, 299, 1885-1887.
- Hughes, S.A. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, World Scientific, 586 p.
- Kakinuma, T., Ohishi, S., Yamamoto, Y., Nakamura, K. and Kitamura, R. (2009). Seepage flow in a breaker zone. *J. JSCE (Coastal Engineering)*, B2-65(1), 126-130 (in Japanese).
- Kamali, B. and Hashim, R. (2011). Mangrove restoration without planting. *Ecological Engineering*, 37, 387-391.
- Lee, S., Park, J. and Hong, C. (2009). Hydraulic experiment on the effects of beach erosion prevention with flexible coastal vegetation. *J. Ocean Eng. Technol.*, 23(1), 31-37 (in Korean).
- Lee, W., Shin, S., Jeong, Y. and Hur, D. (2014). Numerical studies on rip current control using scene-friendly structures at haeundae beach, Korea. *Journal of Coastal Research*, 72, 69-74.
- Miyatake, M., Abe, S., Kimura, K. and Ochi, M. (2013). Effects of saturated-unsaturated seepage on swash sediment transport by grain sizes changes. *J. JSCE (Coastal Engineering)*, B2-69(2), 76-80 (in Japanese).
- Nordstrom, K.F. (2014). Living with shore protection structures: a review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150, 11-23.
- Ostrowski, R. and Szymtkiewicz, M. (2008). Sustainable Measures of Shore Protection Against Erosion and Flooding. *Taiwan-Polish Joint Seminar on Coastal Protection*.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2013). Rock grade control structures and stepped gabion weirs; scour analysis and flow features. *Acta Geophysica*, 61(1), 126-150.
- Park, J. (2013). Analysis of the forest road cut-slope erosion control and rehabilitation techniques using gabion systems with vegetation base materials. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 102(1), 30-37.
- Scheel, H.J. (2014). New type of tsunami barrier. *Nat. Hazards*, 70, 951-956.
- Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T.J., Herman, P.M., Ysebaert, T. and De Vriend, H.J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504(7478), 79-83.
- Sunamura, T. and Horikawa, K. (1974). Two Dimensional Beach Transformation Due to Waves. *Proc. 14th ICCE, ASCE*, 920-938.
- The Times of India, Gabion seawall fails to protect Keri beach from erosion. Naik, Keshav. (Online) [New Delhi] 17 July 2013.
- Yang, R., Wu, Y., Hwung, H., Liou, J. and Shugan, I. (2010). Current countermeasure of beach erosion control and its application in Taiwan. *Ocean & Coastal Management*, 53(9), 552-561 (in Korean).
- Yoon, J. (2004). Status and countermeasures of coastal erosion in South Korea. *Proc. National Inst. for Dis. Preven.*, 6(3), 25-37.
- Yoon, T.H., Lee, J.J. and Lee, B.H. (2003). Bridge scour protection using sack gabions. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(1B), 1-9 (in Korean).

---

Received 21 January, 2019

1<sup>st</sup> Revised 7 February, 2019

2<sup>nd</sup> Revised 8 March, 2019

3<sup>rd</sup> Revised 18 October, 2019

Accepted 25 October, 2019