인공사석 배열에 따른 파랑에너지 저감효과 분석

Analysis of the Wave Energy Reduction Effect by Different Artificial Riprap Arrangement

김하룡* · 한기장** · 정상만*** · 김기동****

Kim, ha yong · Han, ki jang · Jeong, sang man · Kim, kee dong

Abstract

The locally constructed revetment structures for coastal protection are presently made of impervious concrete materials. However, the wave energy reduction effect of present revetment structures are considerably inefficient which yields to bed scouring and thus, collapsing of the revetment structures. Studies on the analysis of the influence of riprap arrangement on the friction area and void fraction, for wave energy reduction, are insufficient. Therefore, this study analyzed the wave energy reduction effect of various artificial ripraps, made with varying friction area and void fraction, in different riprap arrangements. The results of the analysis showed that the increase of both friction area and void fraction of arranged artificial ripraps yields to a more efficient wave energy reducing material intended for revetment structures.

Key words : Wave energy, Hydraulic model test, Friction area, Voids rate, Artificial shore protection, Reflexibility, Wave run-up

요 지

현재 국내 연안에 시공된 호안구조물은 불투수성 콘크리트 재료로 이루어져 있다. 그러나 파랑에너지 감소 효과가 미미한 획일적인 형식으로 저면 세굴로 인한 구조물 붕괴, 반사파에 의한 해빈 침식으로 자갈층이 형성되는 문제점을 발생시키고 있다. 파랑의 에너지를 제어하기 위하여 다양한 형태의 투수성 구조물들을 사용하지만 구조물의 제원이 파랑에너지 저감에 미치는 영향에 관한 연구는 수행된 사례가 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 다양한 마찰면적과 공극률을 갖는 인공사석들에 대하여 수리모형실험을 수행하여 마찰면적과 공극률이 파랑에너지에 미치는 영향을 검토해보았다. 그 결과, 마찰면적과 공극률이 증가할수록 파랑에너지 감소 효과가 커지며 사석의 배열이 파랑에너지 감소에 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 파랑에너지, 수리모형실험, 마찰면적, 공극률, 인공사석, 반사율, 처오름

1. 서 론

현재 국내 연안에 시공된 호안구조물은 불투수성 콘크리트 재료로 이루어져 있고 급경사 또는 직립의 획일적인 형식이다. 경사 및 직립식 호안 구조물은 파랑에너지가 감소 효과가 미미하며 호안 구조물의 저면 세굴로 인한 구조물 붕괴, 반사파에 의한 주변해빈 침식으로 자갈층이 형성되는 문제점을 발생시키고 있다(국토해양부, 2010). 사석구조물의 안정성에 대한 연구는 Tompson and Shuttler(1975)가 최초로 수행했으며 Anderson et al. (1992), Van djik(2001), verhagen et al.(2003), van gent and pozueta(2004)는 월파의 거동을 고려하지 않고 파랑조건에 따른 배후면 피복재의 이탈 여부를 확인하여 안정성을 검토하였다(류용욱 등, 2009) 김선우(2000)는 소파블록의 처오름에 의한 월파랑에 대한 수리특성

을 도출하였고, Shankar and Jayarath(2003)는 월파랑과 처오름에 미치는 입사파고와 주기의 결합 효과의 설명은 파형 경사가 중요한 지표가 된다는 것을 보였다(최동석, 2008). 이원(2008)은 경사식 사석 호안구조물의 월파특성을 분석하여 월파 발생량에 대해 연구를 수행하였으며 박진국(2003)은 해안 침식 방지를 위해 BMS 공법에 대한 해외사례 연구를 통해 국내 적용성 여부에 대해 분석하였다. 또한 한재명 등(2005, 2006)은 환경친화형 해안보호 호안블록을 개발하여 해안침식 저감 효과에 대해 분석하였으며 김광진(2007)은 자연친화형 CE블록을 개발하여 그 적용성을 분석하였다. 기존에 수행된 대부분의 연구는 파랑에너지 저감 및 해안침식 저감을 위한 사석 및 블록 개발에 대한 내용이 주된 내용으로 사석의 배열 및 형상이 파랑에너지 저감에 미치는 영향에 관한 연구는 수행된 사례가 거의 없다. 따라서 본 연구에서는

*정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail : civilkhy@kongju.ac.kr)

**공주대학교 건설환경공학과 석사과정

***정회원 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

****정회원 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수(교신저자)

다양한 마찰면적과 공극률을 갖는 인공사석들을 제작하여 마찰면적과 공극률이 파랑에너지에 미치는 영향을 수리모형실험을 통하여 분석하고자 한다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설

수리모형실험에 사용된 단면조파실험장치는 폭 1.0 m, 높이 1.5 m, 길이 50.0 m의 직사각형 수로와 전기서보피스톤식 조파기로 구성되어 있으며 스펙트럼 함수에 의한 불규칙파와 주어진 파고와 주기에 대응하는 규칙파 재현이 가능하다. 단면수조에서의 실험결과는 파고계, 파압계 및 유속계 등을 연결하여 동시에 16채널에서 저장할 수 있다. 수로의 양면은 강화유리로 처리하여 실험장면 관찰이 용이하도록 되어 있다. 또한 조파판 전면에 용량식 파고계가 부착되어 있어 파고계에서 측정된 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어가 가능하고 조파판 반대 끝 부분은 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다. 본 연구의 수리모형실험에 사용된 단면수로의 제원 및 기능은 표 1과 같다.

2.2 모형제작

수리모형실험에 사용된 사석은 파고에 의해 유실되지 않는 직경 및 중량을 계산하여 3가지(8.80 cm, 4.85 cm, 4.40 cm) 형태로 결정하였다. 구형의 사석은 제작의 경제성과 시공성 그리고 수리모형실험의 현실성 등을 고려하여 정26면체 형상으로 제작하였으며 앞서 결정한 3가지 크기의 사석을 다양하게 배열하여 마찰면적이 가장 큰 3개의 배열을 선정하였다. 일반적으로 어떤 물리량(힘, 에너지, 속도)에 대해 마찰(저항)

이 커질수록 손실은 커진다. 따라서 단위 부피안에 마찰면적이 가장 큰 형상(마찰면적/부피)의 인공사석이 파랑에너지 감소에 가장 효율적일 것이다. 원기둥의 경우 직경(d)과 높이(h)의 비가 1에 가까울수록 표면적/부피 비가 작지만 $d/h > 1$ 인 얇은 원판의 경우에는 직경은 크게 두께는 얇게 할수록, $d/h < 1$ 인 가느다란 원기둥의 경우에는, 직경은 줄이고 길이를 길게 할수록 마찰면적에 대한 부피 비를 크게 할 수 있다. 그림 1과 같이 구형과 똑같은 부피를 갖는 원기둥과 얇은 판의 길이(d)를 늘려가면서 비교한 결과 마찰면적이 증가하였다. 이론상으로 원기둥의 길이와 얇은 판의 직경이 커질수록 마찰면적은 무한대로 증가하겠지만 실제 구조물로 적용시키기 위해서는 적절한 크기를 선정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 구형 사석과 같은 부피에서 마찰면적이 증대되어 파랑에너지에 영향을 줄 것으로 기대되는 원기둥과 원판 捨石形狀에 대해 제작성과 강도 등을 고려하여 사석의 크기 및 간격을 적절하게 조정하여 원기둥형, 원판형 각각 3Case 씩 6Case의 사석 배열에 대한 모형을 제작하였다. 또한 급경사 호안 구조물에서 마찰면적과 공극률을 극대화 시켰을 때 파랑에너지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1:1.5 경사를 갖는 원기둥 및 얇은판 사석 모형을 제작하였다. 수리모형실험은 無捨石形, 捨石形 3Case, 원판형 3Case, 원기둥형 3Case, 1:1.5 경사 원기둥 및 얇은판 2Case 총 12Case의 사석 모형을 제작하여 수행하였다. 사석 모형별 특징은 표 2와 같다.

2.3 실험조건

실제 바다에서의 파는 주기와 진폭이 매우 복잡한 불규칙파 형상을 가지고 있지만 이러한 불규칙파도 여러 성분의 규칙파가 합성되어 이루어진 것이므로 기초적인 연구에서는 수심이 일정한 바다에서 일정한 주기와 진폭을 가진 2차원 규칙파가 공극률과 마찰면적에 미치는 영향을 규명하는 것은 중요하다 이러한 이유로 본 연구에서는 전체 실험안에 모두 동일한 수심(h) 0.5 m를 적용한 규칙파를 이용하여 수리모형실험을 수행하였다. 다양한 파고에 대한 영향을 분석하기 위하여 5가지 파고(H)(2, 4, 6, 8, 10 cm)에 대해서 실험하였으며 천해영역과 중간수심영역을 적절히 고려할 수 있도록 4개의 주기(2, 4, 5, 6 초)를 사용하였다. 주기가 6초인 경우에는 상대수심이 0.239가 되며 주기가 2초인 경우에는 상대

표 1. 단면수로 및 조파기 특성

구 분		실험시설 및 장비
수로제원		1.0m(폭) × 1.5m(높이) × 50.0m(길이)
조파기 성능	수량 및 폭	0.98m × 1 wave boards
	최대파고	0.4m
	재현주기	0.5 ~ 5.0 sec
	최대수심	1.0m
	구동방법	전기서보피스톤식

(a) 같은 부피의 구형, 원기둥, 얇은판

(b) 길이(d) 증가에 따른 마찰면적의 변화

(c) 같은 부피에서 원기둥과 얇은판의 마찰면적 비교

그림 1. 형상별 마찰면적 변화량

표 2. 사석 모형별 특징

실험모형	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10	Case11	Case12
경사	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 1.5	1 : 1.5
형상	무사석	사석	사석	사석	얇은판 (원형)	얇은판 (원형)	얇은판 (원형)	원기둥	원기둥	원기둥	원기둥	얇은판 (직사각형)
계략도
단위부피당 마찰면적 (m ²)	2.24	6.3	9.4	10.2	15.2	15.6	16.3	20.8	21.3	21.7	63.7	57.5
단위부피당 공극률 (%)	-	39.8	36.8	34.3	34.3	39.7	44.9	34.3	39.3	44.8	52.6	46.8

표 3. 주기(T)에 대한 파장(L), 파수(k), 상대수심(kh) 산정 결과

주기 [T] (sec)	수심 [h] (m)	파장 [L] (m)	파수 [k] (1/m)	상대수심 [kh] (무차원)	해역
6	0.5	13.16	0.477	0.239	천해영역
5	0.5	10.92	0.575	0.288	천해영역
4	0.5	8.67	0.725	0.363	중간수심
2	0.5	4.06	1.549	0.775	중간수심

수심이 0.775가 된다. 이상의 결과를 바탕으로 본 연구의 수리모형실험의 실험과 제원을 표 3에 정리하였으며 실험과 산정 결과 실험모형 1Case에 5가지 파고(H), 4가지 주기(T)로 20회의 실험조건을 결정하였으며 수리모형실험시 측정에 대한 오차를 줄이기 위하여 각 경우에 대해 3회씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 표에서 k값은 파수를 의미하며 다음과 같이 선형분산관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma^2 = g \times k \times \tanh k \times h \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{2 \times \pi}{T} \quad (2)$$

여기서, σ 는 각 주파수, h 는 수심, T 는 주기를 의미한다.

2.4 실험방법

1.0m×1.5m×50.0m의 직선수로 35m 지점에 표 2에 도시된 12Case의 사석모형을 위치시키고 4대의 용량식파고계를 설치하여 처오름 및 반사율을 측정하였다. 1번 파고계는 조파판 전면에 부착하여 수면상태를 파악하고 모형 구조물에서 반사되어 조파판으로 돌아오는 반사파를 측정하여 반사파 흡수장치의 입력자료 측정에 사용하였고 반사율은 2번과 3번 파고계를 이용하였다. 반사율은 제체 전면에 임의 간격으로 설치된 두 개의 파고계로부터 독취된 자료를 바탕으로 Goda와 Suzuki(1976)가 제안한 이점법 방법으로 계산하였다. Goda와 Suzuki(1976)의 입·반사 분리기법은 주어진 거리 내에서 중복파의 각 성분과 위상차가 일정하다는 점에서 동시 파형을 이용하여 성분파 에너지 사이의 비를 산출하는 방법으로 수심과 주기에 따라 2개의 파고계를 주기에 따라 간격

그림 2. Case별 마찰면적과 공극률의 관계

을 조정하여 각각의 위치에서 파형을 독취한 후 파형자료로부터 반사율을 계산하는 것이다. 이 경우 파고계의 간격이 파장의 절반의 정수배가 되면 반사율이 발산하므로 파장의 절반의 정수배가 되지 않도록 주의하여야 한다. 4번 파고계는 제작한 모형의 사면과 나란히 설치한 후 정수면상의 처오름을 측정하였다. 또한 동영상을 이용한 화상해석법을 이용하여 측정된 데이터에 오류가 있을시 비교 데이터로 이용하였다. 호안에 요구되는 기능에서 월파량을 측정하고 분석하는 것 역시 중요하지만 월파를 허용하였을 경우 파랑에너지가 그만큼 소산되어 반사율이 낮게 측정되므로 본 논문에서는 월파는 허용하지 않는 것으로 실험하였다. 다만 실험 Case별 처오름 관측값으로 월파에 대한 정성적인 분석이 가능할 것으로 사료된다. 실험모형 Case별 마찰면적과 공극률의 관계는 그림 2와 같다.捨石形狀별 마찰면적은 50%씩, 공극률은 5%씩 증가하며 Case4(사석), Case5(얇은판) 그리고 Case8(원기둥)은 공극률이 34.3%로 같으며 Case5~7(얇은판)은 단위부

그림 3. 수리모형실험 측정결과 비교 계획

피당 마찰면적이 거의 비슷하나 공극률은 5%씩 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 3과 같이 Case4(사석), Case5(얇은판) 그리고 Case8(원기둥)의 측정값 비교를 통해 공극률이 같을 때 마찰면적의 변화가 파랑에너지 변화에 미치는 영향과 Case5~7(얇은판)과 Case8~10(원기둥)의 측정값 비교를 통해 마찰면적이 비슷할 때 공극률 변화가 파랑에너지에 미치는

영향을 분석하였으며 Case4(사석), Case6(얇은판) 그리고 Case10(원기둥)의 측정값 비교를 통해 마찰면적과 공극률이 같이 변화할 때 파랑에너지에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Case11과 Case12의 측정값을 분석하여 급경사 호안에서 마찰면적과 공극률의 극대화에 따른 파랑에너지에 대한 영향을 분석하였다. 이상의 내용을 표 4의 수리모형실험결과 분석목적 분류표에 정리하였다.

3. 실험결과 및 분석

파고(H)가 커질수록 최대치오름이 커지기 때문에 측정값을 그대로 이용하여 분석하는 것은 한계가 있다. 따라서 수리모형실험을 통해 측정한 최대치오름 높이는 입사파의 파고로 무차원화하여 분석하였다.

3.1. 無捨石形과 捨石形 호안구조물의 실험 결과 비교

無捨石形 모형인 Case1의 실험결과에 대한 Case2~Case10

표 4. 수리모형실험결과 분석목적 분류

No.	분석 목적	Case (사석모형)
1	· 無捨石形과 捨石形 호안 구조물의 파랑에너지에 대한 영향 분석	Case 1~10
2	· 마찰면적 증가와 공극률 감소가 파랑에너지에 미치는 영향 분석	Case 2~4
3	· 마찰면적 증가가 파랑에너지에 미치는 영향 분석	Case 5~7, Case 8~10
4	· 마찰면적과 공극률 증가가 파랑에너지에 미치는 영향 분석	Case 4, 5, 8
5	· 마찰면적과 공극률 증가가 파랑에너지에 미치는 영향 분석	Case 4, 6, 10
6	· 마찰면적과 공극률의 극대화에 따른 파랑에너지에 대한 영향 분석	Case 11, 12
7	· 기존 호안사석과의 정성적 분석을 통한 파랑에너지 저감 효과 분석	

표 5. Case1 최대치오름에 대한 Case2~Case10의 최대치오름 저감 비율 (%)

주기(T) (sec)	파고(H) (cm)	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
2	2	14.9	40.5	17.4	-16.0	-5.8	-4.3	3.5	1.4	44.2
	4	24.5	16.8	13.5	-30.1	-11.5	-3.9	-3.1	0.7	28.6
	6	7.5	23.8	7.7	-35.1	-11.5	-6.5	-1.9	-0.5	25.8
	8	4.6	10.3	-0.5	-33.9	-13.7	-15.5	-1.6	-4.7	24.3
	10	16.8	11.6	10.5	-24.3	-10.0	-9.3	1.6	1.2	23.2
4	2	0.0	-5.5	-12.6	-28.1	-3.5	-2.9	-11.8	-2.6	-1.7
	4	8.5	15.9	6.9	-0.9	6.4	10.4	1.9	9.2	13.7
	6	20.4	17.6	13.7	8.7	11.0	13.9	12.5	19.8	24.0
	8	27.3	25.8	28.6	18.7	22.4	24.4	23.8	30.1	35.8
	10	27.1	34.2	31.7	22.9	26.2	26.5	33.9	33.3	39.6
5	2	39.6	40.3	36.6	34.4	39.0	38.9	40.0	27.3	43.2
	4	47.4	49.3	42.1	40.6	42.5	46.0	52.4	37.5	49.0
	6	51.4	49.6	46.3	41.6	46.1	45.0	47.3	43.0	53.0
	8	50.3	49.5	49.2	42.0	44.7	47.2	51.4	40.3	56.4
	10	44.8	49.7	46.6	38.9	42.6	43.8	48.6	44.3	55.6
6	2	13.3	16.2	9.5	3.6	8.6	13.8	14.0	-5.9	18.1
	4	42.0	50.4	43.0	37.0	40.9	46.2	46.0	37.1	49.6
	6	38.6	48.4	40.5	33.9	37.6	40.6	46.2	33.2	52.2
	8	39.3	44.8	40.2	31.3	35.4	36.7	43.0	30.4	51.7
	10	36.9	42.2	37.5	30.6	34.1	35.3	43.1	39.0	50.7
Average		27.8	31.6	25.4	10.8	19.1	21.3	24.5	20.7	36.9

의 최대처오름 비율이 표 5와 같다. 최대처오름의 경우 주기가 짧은 2sec에서는 Case1보다 높거나 비슷한 것으로 측정되어 에너지 감소 효과가 좋지 않은 것으로 분석되었다. 이는 공극률이 커짐에 따라 공극사이에 저류 가능한 물이 많아 지지만 저류된 물이 배출되기 전에 파도가 다시 밀려와 공극사이에 저류된 물이 함께 처오르기 때문이다. 실제로 공극이 작은 Case2~Case4보다 Case5~Case10의 최대처오름 비율이 높게 관측되는 것을 표 5를 보면 확인할 수 있다. 특히 원판형 형상인 Case5~Case7의 최대처오름이 높게 관측되는데 이는 입사파가 판에 부딪힌 후 판과 판 사이의 공극에서 휘돌아 올라가는 특성을 보이기 때문이다. 주기가 길어짐에 따라 마찰면적과 공극이 파랑에너지 감소에 효과가 있는 것으로 보이며 최대처오름 저감 비율이 커지는 것이 이를 뒷받침 한다. 특히 같은 주기에서 파고가 높을수록 파랑에너지 감소 효과가 좋은 것으로 분석되며 이는 파고가 낮으면 그만큼 호안 구조물에 닿는 면적이 작기 때문에 마찰면적과 공극률 확대에 의한 파랑에너지 감소 효과가 적기 때문이다. 같은 주기에서 파고가 높아짐에 따라 호안구조물에 의한 파랑에너지 감소 효과가 좋아지는 것 역시 표 5를 보면 알 수 있다.

표 6은 無捨石形 모형인 Case1에 대한 Case2~Case10의 반사율 비율 표이다. 주기 2sec에서 Case2~Case10의 반사율이 無捨石形인 Case1에 반사율의 50% 미만으로 주기가 짧을수록 반사율이 낮으며 주기가 길어질수록 반사율이 높아지는 경향을 보이는 것으로 관측되었다. 또한 같은 주기에서 파고가 높아짐에 따라 반사율은 증가 또는 감소하는 경향을

보여 반사율은 파고보다는 주기에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 마찰면적과 공극률을 증가시킨 Case2~Case10 모두 無捨石形인 Case1에 비해 최대처오름 및 반사율이 낮게 측정되어 파랑에너지 감소효과는 있는 것으로 판단되지만 최대처오름의 경우 마찰면적 및 공극률과 함께 호안 구조물의 배열이 파랑에너지 감소에 큰 효과를 미친다는 것에 유의해야 한다. 수리모형실험결과 無捨石形인 Case1에 비해 최대처오름 저감 비율이 평균 36.9%, 반사율 저감 비율이 평균 35.4%로 Case10이 파랑에너지 감소효과가 가장 좋은 호안구조물 형상인 것으로 분석되었다.

3.2 마찰면적 증가와 공극률 감소가 파랑에너지에 미치는 영향 분석

사석모형인 Case2~Case4는 마찰면적은 커지고 공극률이 작아지는 특징을 가지는 호안구조물 형상으로 4가지 주기와 5가지 파고에 대해서 3회에 걸쳐 실험을 수행하였으며 그림 4와 그림 5는 Case1~Case4의 주기에 따른 파고별 무차원 최대처오름비와 반사율 측정 결과이다. 공극률이 가장 작고 마찰면적이 가장 큰 Case4의 최대처오름이 대체적으로 높게 측정되었으며 공극률과 마찰면적이 중간인 Case3이 최대처오름이 전반적으로 낮게 측정되었다.

반사율 측정 결과 Case3이 최대처오름과 같이 낮게 측정되었으나 공극률이 가장 크고 마찰면적이 가장 작은 Case2가 전반적으로 높게 측정되었다. 마찰면적은 커지고 공극률은 작아지는 경우에 대한 실험 결과 파도의 처오름은 공극률의 영향이 크고 반사율은 마찰면적의 영향이 큰 것으로 분석되었

표 6. Case1 반사율에 대한 Case2~Case10의 반사율 저감 비율 (%)

주기(T) (sec)	파고(H) (cm)	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
2	2	67.2	75.0	55.9	51.0	52.8	56.8	61.7	67.6	85.8
	4	66.4	66.0	52.1	51.3	54.9	56.1	58.1	62.5	75.9
	6	59.1	63.0	52.4	49.4	53.8	55.8	55.6	60.9	72.7
	8	57.4	61.0	51.9	49.4	53.0	53.7	53.5	60.0	70.8
	10	56.1	60.0	52.2	48.8	52.4	51.8	53.1	59.5	68.4
4	2	13.0	20.1	20.7	23.2	29.7	33.3	21.5	22.4	25.4
	4	17.7	22.9	21.9	20.6	23.8	28.7	20.5	23.3	29.2
	6	19.2	24.2	22.6	20.6	24.1	25.2	21.3	25.3	31.8
	8	19.3	24.6	21.5	21.3	21.3	22.3	19.9	26.0	34.1
	10	19.1	21.5	18.2	18.9	17.2	18.9	16.9	24.9	33.2
5	2	3.0	8.5	8.6	15.1	18.0	21.9	13.9	14.8	13.7
	4	9.2	14.8	14.4	15.5	19.6	23.3	17.0	19.6	20.4
	6	12.9	18.6	16.9	16.2	20.9	24.0	18.2	21.6	24.5
	8	9.5	16.7	14.1	10.5	17.0	19.8	13.3	18.1	23.8
	10	10.1	17.7	13.9	7.9	16.6	18.9	11.9	16.3	23.4
6	2	-0.5	4.1	3.9	7.3	10.9	12.8	8.4	9.2	5.6
	4	1.8	6.5	4.6	7.6	10.7	12.7	7.8	8.9	10.6
	6	6.3	11.0	8.6	10.2	14.3	16.1	10.8	12.6	15.3
	8	9.6	15.2	12.5	13.4	18.1	19.5	14.2	17.8	20.1
	10	11.8	17.4	15.2	15.4	19.9	21.2	16.3	19.0	22.8
Average		23.4	28.4	24.1	23.7	27.4	29.6	25.7	29.5	35.4

그림 4. Case1~Case4의 주기(T)에 대한 파고별 무차원 최대처음비

그림 5. Case1~Case4의 주기(T)에 대한 파고별 반사율

으며 마찰면적과 공극률의 적절하게 조합될 경우 파랑에너지 감소에 효과적일 것으로 사료된다.

3.3 공극률 증가가 파랑에너지에 미치는 영향 분석(捨石形狀의 영향 분석 포함)

비슷한 마찰면적을 가지며 공극률이 5%씩 증가하는 얇은 판형 모형인 Case5~Case7와 원기둥형 모형인 Case8~Case10에 대해서 4가지 주기와 5가지 파고에 대해서 3회에 걸쳐 실험하였다. 그림 6~7은 Case5~Case7의 주기에 따른 파고별 무차원 최대처음비와 반사율 측정 결과를 無捨石形인

그림 6. Case5~Case7의 주기(T)에 대한 파고별 무차원 최대처음비

그림 7. Case5~Case7의 주기(T)에 대한 파고별 반사율

그림 8. Case8~Case10의 주기(T)에 대한 파고별 무차원 최대처음비

그림 9. Case8~Case10의 주기(T)에 대한 파고별 반사율

Case1과 비교한 그림이며 그림 8~9는 Case8~Case10의 주기에 따른 파고별 무차원 최대처음비와 반사율 측정 결과를 無捨石形인 Case1과 비교한 그림이다. 두 가지 형상 모두 짧은 주기에서 최대처음비의 저감 효과가 낮은 것으로 관측되었으며 이는 앞서 언급한 것과 같이 커진 공극에 저류된 물이 다음 파도가 도달했을 때 파랑에너지 저감 효율을 저하시키기 때문인 것으로 사료된다. 주기가 길어질수록 공극률이 커질수록 최대처음비 및 반사율이 낮게 측정되어 적정 주기에서 공극률이 커질수록 파랑에너지 감소 효과도 커지는 것으로 분석되었다. 얇은판형인 Case5~Case7 보다 원기둥형인 Case8~Case10의 최대처음비 및 반사율이 낮게 측정되었다. 이것은 얇은판형의 경우 판과 판 사이의 공극에 들어간 물이 저류되지 않고 판에 부딪혀 휘돌아 올라가기 때문에 처

오름이 높아지고 이로 인해 에너지 감소 효과가 작아져 반사율이 높게 측정된 것으로 마찰면적과 공극률이 증가하여도 사석의 배열이 물리적으로 에너지 감소에 효율적이어야 파랑 에너지 감소 효과를 증대시킬 수 있으며 호안구조물 설치시 사석의 배열을 파도가 밀려오는 연직 방향으로 파도와 부딪히는 면적이 작게 하는 것이 파랑에너지 감소에 효과적이라고 판단된다.

3.4 마찰면적 증가가 파랑에너지에 미치는 영향 분석

같은 공극률을 가지며 마찰면적이 50%씩 증가하는 Case4(사석), Case5(얇은판) 그리고 Case8(원기둥)의 무차원 최대처오름비와 반사율 측정 결과가 그림 10~11과 같다. 최대처오름의 경우 단위부피당 마찰면적이 15.2 m²인 Case5(얇은판)가 단위부피당 마찰면적이 10.2 m²인 Case4(사석)보다 높게 측정되었으며 이는 앞서 설명하였듯이 얇은판 형상의 사석모형을 파도와 직각방향으로 배열하여 파도가 판과 판 사이의 공극에서 휘돌아 올라가기 때문이다. 마찰면적이 가장 큰 Case8이 최대처오름 및 반사율이 낮게 측정되었으며 마찰면적이 가장 작은 Case4의 반사율이 가장 높게 측정되어 마찰면적의 증가는 파랑에너지 감소에 효과적이나 사석 형상의 배열도 중요한 것으로 분석되었다.

3.5 마찰면적과 공극률 증가가 파랑에너지에 미치는 영향 분석

그림 12~13은 마찰면적은 50%씩, 공극률은 5%씩 증가하

그림 10. Case4 · 5 · 8의 주기(T)에 대한 파고별 무차원 최대처오름비

그림 11. Case4 · 5 · 8의 주기(T)에 대한 파고별 반사율

는 Case4(사석), Case6(얇은판) 그리고 Case10(원기둥)의 무차원 최대처오름비와 반사율 측정 그래프이다. 최대처오름의 경우 마찰면적과 공극률이 큰 Case6이 Case4보다 높게 측정되었으며 또한 짧은 주기에서 얇은판 모형인 Case6의 최대처오름이 가장 높았다. 이유는 앞서 설명한 것과 같이 사석의 배열에 의한 현상이며 마찰면적과 공극률이 가장 큰 Case10의 최대처오름 및 반사율이 낮게 측정되어 사석의 배열이 에너지 감소에 효율적인 배열이라면 마찰면적과 공극률 증가는 파랑에너지 감소에 효과적인 것으로 분석되었다.

3.6 급경사 모형(Case11, Case12) 실험 결과 분석

급경사 모형인 1:1.5 경사의 원기둥 및 얇은판 모형인 Case11~Case12에 대해서 4가지 주기와 5가지 파고에 대해서 3회에 걸쳐 실험하였으며 그림 14~15에 무차원 최대처오름비와 반사율 측정 결과를 나타내었다. 전체적으로 Case11이 파랑에너지 감소 효과가 더 좋은 것으로 분석되었다. 이는 같은 1:1.5 경사에서 Case11이 Case12보다 마찰면적과 공극률이 크고 직사각형의 얇은 판 형상인 Case12보다 파도 진행 방향에 대한 접촉면적이 작은 형상때문에 파랑에너지를 더 효과적으로 감소시킨 것으로 해석된다. 또한 Case11은 1:2 경사의 Case1~Case10까지의 사석모형보다 파랑에너지 감소 효과가 좋은 것으로 분석되어 급경사라도 마찰면적과 공극률을 극대화 시킨 사석 호안 구조물을 설치하면 파랑에너지에 의한 피해를 최소화 할 수 있으며 완경사 보다 짧은 길이에 호안 구조물이 설치되므로 경제성 확보 및 친환경적인 호안

그림 12. Case4 · 6 · 10의 주기(T)에 대한 파고별 무차원 최대처오름비

그림 13. Case4 · 6 · 10의 주기(T)에 대한 파고별 반사율

그림 14. Case11 · 12의 주기(T)에 대한 파고별 무차원 최대처음
름비

그림 15. Case11 · 12의 주기(T)에 대한 파고별 반사율

표 3.3 Case10(원기둥)과 기존 호안 구조물의 반사율 비교

금회 실험			기존 호안					
Case10(원기둥)			횡 SLIT 케이슨			소파블록(MTB)		
주기(T)(sec)	파고(H)(cm)	반사율	주기(T)(sec)	파고(H)(m)	반사율	주기(T)(sec)	파고(H)(cm)	반사율
2	2	0.129	3.4	0.5	0.459	2.2	9.98	0.366
	4	0.215		1.0	0.339		12.01	0.355
	6	0.238		1.26	0.340		14.02	0.342
	8	0.245					16.00	0.339
	10	0.256					18.00	0.339
4	2	0.665	4	0.5	0.420	-	-	-
	4	0.624		1.0	0.335			
	6	0.609		1.26	0.312			
	8	0.599						
	10	0.604						
5	2	0.764	5	0.5	0.466	-	-	-
	4	0.693		1.0	0.352			
	6	0.643		1.26	0.343			
	8	0.594						
	10	0.576						
6	2	0.825	6	0.5	0.549	-	-	-
	4	0.756		1.0	0.452			
	6	0.705		1.26	0.452			
	8	0.652						
	10	0.610						

구조물 모형이 될 수 있을 것으로 기대된다.

3.7 기존 호안사석과의 정성적 분석을 통한 파랑에너지 저감 효과 분석

파랑에너지 저감을 위해 표 7과 같이 기존 호안사석과 본 논문 실험에 이용된 호안사석 중 저감 효과가 좋은 Case10(원기둥)의 파랑에너지 감쇠 효과를 비교하였다. 실험조건이 달라 직접적인 비교는 어려워 각 호안의 실험에서 측정된 반사율을 기준으로 정성적으로 분석하였다. 각 실험의 비슷한 주기인 2 sec에서는 원기둥 호안 사석이 반사율이 가장 낮으나 주기가 길어지면 횡 SLIT 케이슨 호안사석의 반사율이 낮은 것으로 분석되었으며 사석호안은 방파제와 다르게 해안가에 설치되는 천이영역의 구조물임을 감안했을 때 원기둥형

호안 사석이 파랑에너지 저감에 유리하다고 판단되나 추후 추가 실험을 통해 정확한 분석이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 파랑에너지 저감 및 해안침식 저감을 위해 사석의 배열 및 형상이 파랑에너지에 어떠한 영향을 주는지를 평가하기 위하여 다양한 마찰면적과 공극률을 가지는 12가지 형태의 捨石形狀을 제작하여 수리모형실험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 無捨石形인 Case1을 기준으로 최대처음저감 비율이 평균 36.9%, 반사율 저감 비율이 평균 35.4%로 Case10이 파랑에너지 감소효과가 가장 좋은 호안구조물 형상인

것으로 분석되었다.

- 2) 공극률이 같을 때 마찰면적의 증가가 파랑에너지에 미치는 영향을 분석한 결과 마찰면적이 가장 큰 Case8이 전체 주기와 파고에 대해서 최대처오름과 반사율이 가장 낮게 측정되어 마찰면적이 증가는 파랑에너지 감소에 효과적일 것으로 평가되었다.
- 3) 마찰면적이 같을 때 공극률의 증가가 파랑에너지에 미치는 영향을 분석한 결과 공극률이 가장 큰 Case7과 Case10이 파랑에너지 감소가 가장 잘되는 것으로 평가되었으나 짧은 주기에서는 큰 공극률에 저류된 물이 처오름을 가중시켜 최대처오름을 증가시키는 것으로 분석되었다.
- 4) 마찰면적과 공극률의 변화가 파랑에너지에 미치는 영향을 분석한 결과 마찰면적과 공극률이 증가할수록 파랑에너지에 효과적이나 마찰면적과 공극이 작더라도 파도의 진행방향과 연직방향으로 접촉면적이 작은 사석 배열이 마찰면적과 공극이 크지만 파도의 진행방향과 연직방향으로 접촉면적이 큰 사석 배열보다 파랑에너지 감소에 효과적인 것으로 분석되어 사석의 배열이 파랑에너지 감소에 중요하다고 평가되었다.
- 5) 급경사 호안구조물에서 마찰면적과 공극률의 극대화가 파랑에너지에 미치는 영향을 분석한 결과 1:2 호안구조물 사석 모형들보다 파랑에너지의 감소가 좋은 것으로 평가되어 급경사라도 마찰면적과 공극률을 극대화하면 파랑에너지 감소에 효과적이며 이를 잘 활용하면 친환경성 및 경제성을 갖춘 호안구조물 설치가 가능할 것으로 판단된다.

5. 제 언

본 연구는 사석의 배열 및 형상에 따른 마찰면적과 공극률의 변화가 파랑에너지에 미치는 영향을 평가하였으며 금회 실험을 바탕으로 다양한 경사와 배열에 대해 불규칙과 실험을 추가로 수행할 계획이며 추후 효율성 및 시공성을 감안하여 최적 형상을 제시할 계획입니다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 #09지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김광진 (2010) 자연친화형 CE블록 개발 및 적용성 분석, 박사학위논문, 중부대학교.
- 김선우 (2000) 해안 구조물의 소파블록 특성에 관한 연구: 경사방파제를 중심으로, 석사학위논문, 연세대학교.
- 김인철, 박영우, 유철희, 권혁민 (2003) 새로운 소파블록의 수리특성에 관한 실험적 연구, 한국해안·해양공학회논문집, 제14권, pp. 87-97.
- 박진국 (2003) 해안침식 방지를 위한 BMS공법의 해외사례 연구, 석사학위논문, 중앙대학교.
- 이원 (2008) 사석경사제 호안의 월파특성, 석사학위논문, 한양대학교.
- 최동석 (2008) 투수성 해안구조물의 형상에 따른 파랑변형과 월파특성, 석사학위논문, 경상대학교.
- 류용욱, 이종인, 김영택 (2009) 소파블록포복 케이스 방파제에서 월파의 거동분석: 규칙과 조건, 한국해안·해양공학회논문집, 제21권, 제1호, pp. 54-62.
- 한재명, 이종석, 김희수, 신재욱 (2005) 환경친화형 해안보호 호안블록에 관한 연구, 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, pp. 703-705.
- 한재명, 김영민, 박만교, 이종석 (2006) 자연친화형 소파블록의 개발, 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, pp. 245.
- 국토해양부 (2010) 연안역 녹색조성기술 연구보고서.
- Anderson, O.H., Juhl, J. and Sloth, P. (1992) Rear side Stability of Berm Breakwaters, *Proc. 23rd Coast. Engrg. Conf., ASCE*, 1020-1029.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976) Estimation of incident and reflected waves in random Wave experiments. *Proc. of 15th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, New York* : 828-865.
- Shankar, N.J. and Jayaratne, M.P.R (2003) Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes coastal structure. *Ocean Eng*, pp. 221-238.
- Van Gent, R.A. and Pozueta, B. (2004) Rear-side stability of Rubble Mound Structures, *Proc 29th Coast. Engrg. Conf., ASCE*. 3481-3493.
- Verhagen, H.J., Van Dijk, B. and Nederpel, A. (2003) Riprap Stability on the Inner Slopes of Medium-Height Breakwaters. *Proc. Coast. Struc. Portland*. 213-222.
- Tompson, D.M. and Shuttler, R.M. (1975) *Riprap design for wind wave attack, A laboratory study in random waves*. Willingford, EX 707.
- Van Dijk, B. (2001) *The Rear slope stability of Rubble Mound Breakwaters*. Ms thesis, Delft U of Tech.

◎ 논문접수일 : 2012년 06월 22일

◎ 심사위원회일 : 2012년 06월 25일

◎ 심사완료일 : 2012년 09월 24일