

The Wave Attenuation Effect of Artificial Reef on Coastal Erosion Prevention

Kyoung Ho Kim[#], Hyoun Sik Oh⁺

School of Civil Engineering, 208, E8-6, Chungbuk National University, 52 Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea

Abstract

Coastal erosion should be recognized as one of considerable social problems as well as environmental concerns. The coastal structures such as jetties, breakwaters and submerged breakwaters (or artificial reef) have been utilized as a measure of beach erosion prevention. In fact, these structures reduce wave energy and protect beach erosion. A lot of submerged breakwaters have been recently constructed in the wave field in Korea. To investigate the effect of the coastal structures on reducing wave energy, we analyzed a correlation between wave transmission coefficient(K), Ursell number, wave steepness, and relative depth. Our experimental models confirm wave energy dissipation effects, showing that the wave attenuation rate of submerged breakwaters was 19.2% for the case of the 3 rows. Also, K could derive an empirical formula represented by the Ursell number.

Key words: coastal erosion, artificial reef, submerged breakwater, wave transmission coefficient

1. 서론

해안 침식의 원인은 지구 온난화로 인한 해수면 상승과 이에 따른 고파의 내습과 같이 자연적인 경우도 있겠지만 가장 큰 요인은 하천과 해안의 무분별한 개발이다. 즉, 도시화에 따른 육지 내에서의 유사 공급 격감과 해사 채취, 유사를 교란시키는 해안 구조물들의 설치가 그 직접적인 원인이다. 1990년대 초, 해안 침식을 막기 위한 유일한 방법으로 양빈과 옹벽 등의 방호시설에 의존한 나머지 막대한 비용을 주기적으로 지출하면서도 방호시설물로 인해 해안침식이 가속화되는 역기능을 낳기도 했다. 현재는 해안 침식을 제어하기 위한 대응

책으로서 친환경 재료를 이용한 모래 포집기, 방파제나 잠제, 인공어초 등 환경 영향을 최소화할 수 있는 구조물들이 그 활용 방안으로 떠오르고 있다. 특히 인공어초와 같은 잠제형 구조물들은 파랑 에너지를 감소시켜 해안 침식을 방지하는 역할을 한다.

잠제는 이안제나 돌제와 달리 천단 상을 통한 해수 교환이 원활하기 때문에 생태계에 미치는 영향이 상대적으로 적고 입사파를 감소시켜 해안 침식을 방지함으로써 해안 도로와 같은 인공 구조물의 보호는 물론 해안 주변의 자연관광지 개발을 가능케 하는 친환경 구조물로 평가받고 있다. 이러한 이유로 돌제, 이안제와 같은 선적방호공법(Linear protection method) 보다는 잠

[#] The 1st author: Kyoung Ho Kim, Tel. +82-43-261-2402, e-mail. coastal@chungbuk.ac.kr

⁺ Corresponding author: Hyoun Sik Oh, Tel. +82-43-261-2226, e-mail. octavius@nate.com

제와 같은 면적방호공법(Perched beach method)에 대한 관심이 높아지는 추세이다. 최근에는 잠제의 역할을 가진 인공어초를 설치함으로써 기존의 인공어초가 가진 기능과 함께 연안역으로 들어오는 파랑을 일차적으로 막아주는 잠제로서의 역할을 한다. 또한 구조물 주변의 어군을 형성함으로써 생태계를 건강하게 하는 장점도 가지고 있다.

이러한 수중 구조물의 수리모형실험에 의한 연구동향을 살펴보면, Nakamura, *et. al.*(1966)의 불투과성 사각구조 광폭잠제의 파고 전달률에 대한 연구가 있었고, Tanaka(1976)는 천단폭이 넓은 잠제의 파랑감쇠 및 사빈 안정효과에 대한 연구에서 제체 천단고가 심해파 파고의 0.5~0.75배인 경우가 가장 파고 감쇠율이 크게 된다는 것을 확인하였다. Kobayashi, *et. al.*(1989)은 불투과성 잠제로 입사하는 규칙파에 대한 반사파와 투과파에 대한 거동 특성을 수치해석하고 에너지 소산의 공간변화율, 평균수면차, 단위 폭 당 질량 전달률 등을 산정하였다. Nakayama(1993)는 잠제에 불규칙파를 적용한 실험에서 주기(T)나 파장(L) 보다는 잠제의 천단폭(B)이나 천단수심(R), 설치수심(h) 및 입사파고(H)가 더 큰 영향인자임을 확인하였다. Van der Meer & Daemen(1994)의 저천단 사석 방파제의 안정성과 투과에 대한 연구와 Lee(2008)의 파고를 고려한 인공어초의 형식에 있어 경제적으로 최적화된 모델에 대해 검토 등이 있다.

본 연구에서는 삼곡면 인공어초에 따른 파고감쇠 효과를 2차원 수리모형실험을 통하여 검토하여 매개변수에 대한 전달률을 분석하고 관계식을 제시하고자 한다. 이를 위해 조파수조 내에 설치된 구조물을 중심으로 전·후부에 다수의 파고계를 설치하고, 수위(h), 파고(H), 주기(T) 및 수중 어초의 배열수에 따른 영향을 알아보기 위해 1, 2, 3배열로 변화시켜 각각 실험을 진행하였다. 획득한 실험결과를 분석하여 각 배열에 대한 파랑 감쇠율로 나타내었고, 각각의 파고와 주기에 따른 파고비, 파형경사, 상대수심, Ursell 수에 대한 전달률을 산출하였다. 본 연구를 통해 인공어초의 최적 설치수심을

산정하여 해운에 필요한 최소 수심을 확보함과 동시에 인공어초에 의한 파고의 감쇠효과를 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 기본이론

1. 해안 침식의 방호 기법

1) 선적방호공법(Linear protection method)

선적방호공법 방식은 과거에 주로 해안을 방호하는 공법으로 직립의 호안, 제방이나 소파공을 설치함으로써 해빈의 침식을 막는 기법이다. 선적방호 방식은 해안침식을 적극적으로 방지하는 공법이긴 하지만 <Figure 1>과 같이 전빈이 소멸되고 이에 따른 파랑이 호안에 직접 내습하여 파의 쳐올림 높이와 월파량의 증대를 가져온다. 배후지를 보호하기 위해 소파블록을 추가로 쌓거나 제방이 설치되고, 따라서 시공에서 유지관리에 막대한 비용뿐만 아니라 해안선이 콘크리트 구조물로 뒤덮이는 현상을 초래하여 주변의 자연 경관을 해치는 환경오염을 일으키기도 한다. 또한 이러한 방호기법은 해안침식을 가속화하는 역기능을 갖는 경우가 종종 발생한다.

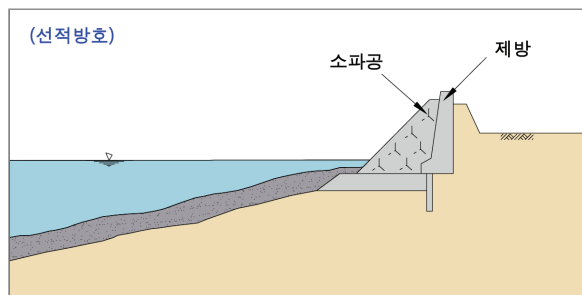


Figure 1. Linear protection method

2) 면적방호기법(Perched beach method)

면적방호공법 방식은 이안제, 잠제, 돌제, 인공곶(Headland) 등을 복합적으로 정비하는 것으로 이들의 소파기능이나 전빈의 회복기능에 의한 파랑의 감쇠를 도모하여 제방의 천단고를 낮게 할 수 있다. 사빈의 회복이나 낮은 천단의 경사호안은 양호한 해안환경을 만

들어내어 시민이 해변으로의 접근을 용이하게 한다. 잠재를 이용한 면적방호방식으로 구조물을 설치한 배후에 양빈을 실시함으로써 침식면적을 줄이고 현재의 상태를 유지하는 방법을 볼 수 있다.

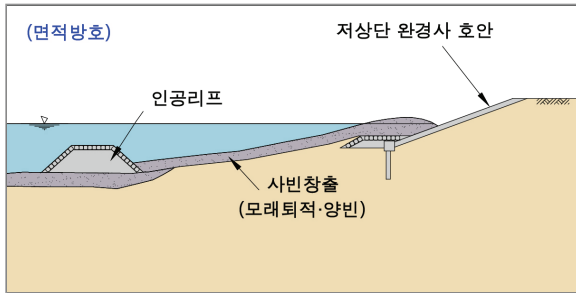


Figure 2. Perched beach method

2. 파고 감쇠효과의 검증을 위한 주요 무차원 매개변수

1) 전달률(K)

전달률은 구조물을 통과한 후 파고에 대한 구조물을 지나기 전 파고의 비를 백분위로 나타낸 것이다. 제체에 인접한 곳에서의 전달파는 파형이 매우 불안정하며, 파고계를 제체에 가깝게 설치하면 전달파가 과대평가 될 수 있으므로 파고계를 제체 후면으로부터 모형상 1.0m(되도록 1파장이 지나는 값이 좋으나 파장이 너무 클 경우 측정범위를 벗어날 수 있다)이상 되는 지점에 설치하여 측정한다. 설치된 파고계로부터 획득한 자료의 평균값을 계산하여 이를 전달파고로 산정하였다. 본 실험에서의 전달률은 식 (1)과 같이 월파에 의한 전달파고(H_T)와 구조물이 설치되지 않았을 때의 동일 위치상 입사파고(H_I)의 비로 산정한다.

$$K = \frac{H_T}{H_I} \quad (1)$$

2) Ursell 수

Ursell 수(U_r)는 식 (2)와 같이 파고(H), 파장(L) 및 수심(h)의 조합으로 표현되는 무차원 수이며, 비선형

파 이론인 2차 이상의 Stokes 파를 급수형태로 전개했을 때 나타난다. 따라서 Ursell 수가 클수록 비선형성이 강하며, 작은 파고에서, 수심에 비해 파장이 클 경우 ($L \gg h$) 2차 이상의 Stokes 파 이론이 적용된다.

$$U_r = \frac{HL^2}{h^3} \quad (2)$$

III. 실험장치의 구성과 실험방법

1. 모형제작

본 연구에서 사용된 인공어초의 제원은 <Figure 3>과 같이 길이 15cm, 높이 10cm이며, 블록 내의 공극을 통한 파의 진행 방향에 대한 안정성 및 수생생물의 서식처를 확보하여 친환경적인 기능을 가진 기능성 구조물로 시공이 간편하다는 장점을 가지고 있다.

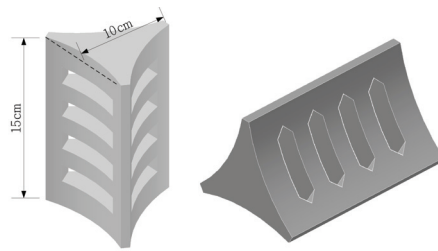


Figure 3. Dimension of artificial reef model

2. 실험장치의 구성

인공어초 모형은 조파수조의 조파장치로부터 15m 떨어진 지점에 설치하였다. 인공어초 모형의 전면부에 3개 후면부에 4개 등 총 7개의 용량식 파고계를 0.3m의 일정한 간격으로 설치하였다(<Figure 4>).

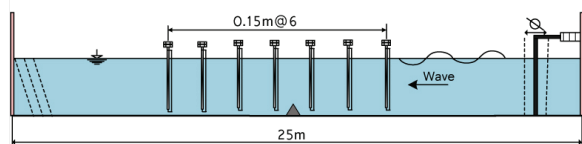


Figure 4. Experimental setup

3. 실험조건

본 연구에서는 상대 수심비가 $0.04 \sim 0.05 < h/L < 0.5$ 인 천해파(중간수심파) 영역을 대상으로 수심(h)과 주기(T), 파고(H) 및 잠제의 배열수를 변화시키며 총 141회의 실험을 수행하였다. 이때 모형은 수리학적으로 Froude 상사를 만족시켜, 주요 무차원 매개변수인 Fr 수나 Ursell 수의 값을 원형과 모형에서 동일한 값을 갖도록 한다. 원형과 모형간의 인자들 간의 범위는 <Table 1>과 같고 수조의 수심이 0.15m, 0.22m, 0.28m, 0.36m, 주기가 0.6초, 0.9초 1.2초 1.6초 2.1초, 파고는 0.03m, 0.05m, 0.08m, 0.10m이다. 또한 수중 구조물의 배열수(n)는 1, 2, 3열로 변화를 주었다.

Table 1. Experimental conditions

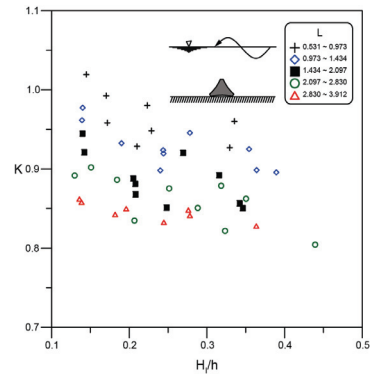
factor	prototype	model
h(m)	4.5~10.8	0.15~0.36
H(m)	0.9~3.0	0.03~0.1
T(sec)	3.3~12.0	0.6~2.191
L(m)	16~117	0.531~3.911
H/L	0.00982~0.095	0.00982~0.095
h/L	0.058~0.641	0.058~0.641
Fr	0.0048~0.383	0.0048~0.383
Ur	0.331~106.34	0.331~106.34

IV. 결과 분석

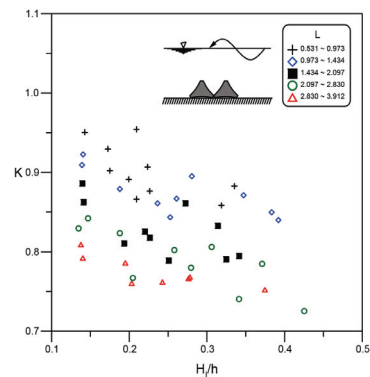
실험으로부터 획득한 데이터를 분석하여 파고비 (H/h)와 파형경사(H/L), 상대수심(h/L)를 파의 전달률(K)에 대해 각각 그래프로 도시하고 분석하였다.

1. 파고비 (H/h)

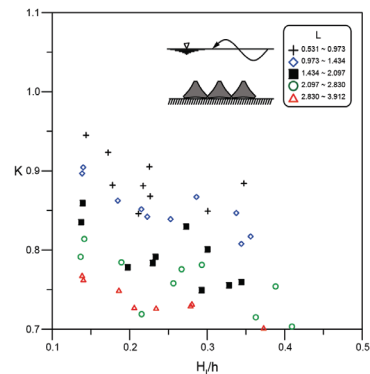
<Figure 5>는 수심에 대한 파고비와 전달률의 관계를 파장별에 따라 도시한 것이다. 이 때 파고는 입사파고(H_i)를 사용한다. 그림은 구조물의 배열수가 많을수록 파고감쇠의 효과가 크며, 동일 배열 수에 대해서 파장이 클수록 전달률은 작은 값을 나타낸다.



(a) Arranged in single row



(b) Arranged in two rows



(c) Arranged in three rows

Figure 5. H/h vs K

2. 파형경사 (H/L)

<Figure 6>은 파형경사와 전달률 간의 관계를 배열수에 따라 도시한 것이다. 수심의 효과가 배제되었기 때문에 자료의 분산이 크지만 피팅된 곡선은 세 가지 배열 상에서 동일한 형태를 보이고 있다. 또한 배열수가 클수록 전달률이 작은, 즉 파고감쇠 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

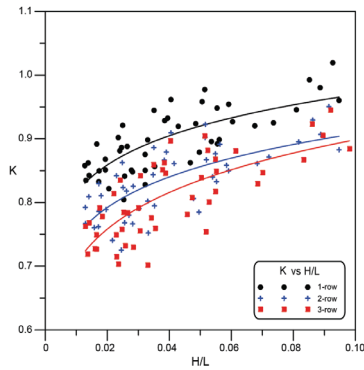


Figure 6. H/L vs K

3. 상대수심 (h/L)

상대수심과 전달률은 매우 뚜렷한 상관성을 보인다. 파형경사의 경우처럼 배열수가 많을수록 파고감쇠 효과가 크게 나타났다. 파형경사가 0.05~0.3인 부분에서의 피팅 곡선 경사가 크게 나타나는데 이 조건의 해역은 천해파(중간수심파)영역으로, 파장에 비해 수심이 작을수록 파고감쇠 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

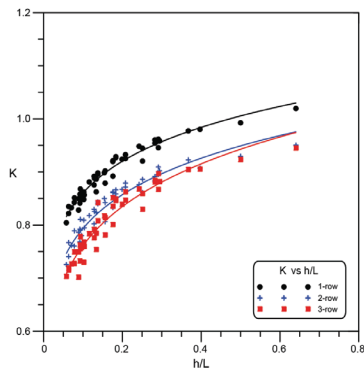


Figure 7. h/L vs K

4. Ursell 수

해저로 전달되는 파랑 에너지는 수심에 반비례하고 파고(H), 주기(또는 파장(L))에 비례한다. 이러한 인자들 간의 조합으로 표현되는 상대수심(h/L)과 파형경사(H/L) 등은 최종적으로 Ursell 수($Ur = HL^2/h^3$)로 표현 가능하다. 일반적으로 Ur 값이 클수록 파의 비선형성이 크다고 할 수 있으며 쇄파대나 천해역이 그러한 수역에 해당한다. <Figure 8>에서 보는 바와 같이 Ur에 따른 전달률의 상관성은 매우 높게 나타났으며 배열수가 많을수록 파고 감쇠 효과는 크지만, 점진적으로

그 효과는 감소하는 것으로 보인다.

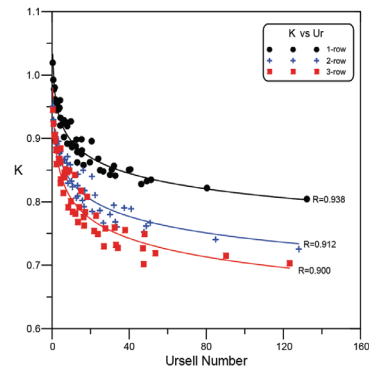


Figure 8. Ur vs K

5. 인공어초의 배열수에 따른 파고의 평균 전달률
본 실험의 대상인 극천해역 및 천해역에서 인공어초를 1, 2, 3열로 배열할 경우, 전달률은 각각 89.8%, 83.3%, 80.8%로 나타났으며, 배열수가 많을수록 파고 감쇠율이 컸다. <Figure 9>는 구조물의 배열수가 1, 2, 3열 배열일 때의 각각의 10.2%, 16.7%, 19.2%의 파고 감쇠율을 나타내고 있다.

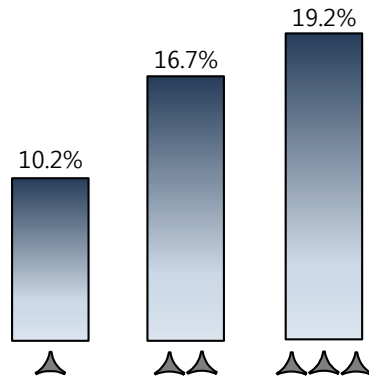


Figure 9. Wave attenuation ratio according to arrangement of artificial reefs

6. 전달률 산정을 위한 실험식

실험식은 각 매개변수에 따른 실험의 결과 값을 근거로 하여, <Figure 8>에 도시한 그래프는 식 (3)과 같이 Ur의 함수식으로 표현할 수 있다. 실험식에 포함된 계수 a 및 b는 <Table 2>와 같다.

$$K = a(Ur)^b \quad (3)$$

Table 2. Coefficients of the experimental equations

arrangement	a	b	coefficient of determination (R^2)
1	0.988	-0.042	0.9377
2	0.931	-0.049	0.9120
3	0.920	-0.058	0.8999

V. 결론

천해역을 대상으로 수심(h), 주기(T), 파고(H), 배열수를 변화시키며 실험을 수행한 후, 획득한 자료를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

H/h 가 클수록 파고 감쇠율이 큰 반면, 파장이 클 경우 파고 감쇠율은 작게 나타난다. 또한 H/L 이 증가함에 따라 파고감쇠 효과는 적어진다. h/L 이 증가할수록 파고감쇠 효과는 저하하며, 특히 $h/L < 0.4$ 인 영역에서 파고감쇠 효과가 양호하게 나타났다. 즉, 파고 감쇠효과가 큰 해역은 상대수심비가 $0.04 \sim 0.05 < h/L < 0.4$ 인 천해 및 극천해역인 것으로 판단된다.

전달률과 가장 강한 상관성을 보인 무차원 매개변수는 Ur 이며 Ur 에 따른 파고감쇠 효과를 보면, $Ur > 40 \sim 50$ 의 경우 전달률은 1열 배치의 경우 0.83, 2열배치의 경우 0.74, 3열 배치의 경우 0.7에 서서히 접근한다. 따라서 효율적인 Ur 의 범위는 $0 < Ur < 40$ 인 것으로 판단된다.

평균 전달률로부터 계산된 파고 감쇠율은 1열의 경우 10.2%, 2열의 경우 16.7%, 3열의 경우 19.2%로 나타났다. 결과적으로 배열수가 많을수록 파고감쇠 효과가 크지만 감소폭은 지수 함수적으로 감소한다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 일반과제 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Kobayashi, N. and A. Wurjanto. 1989. Wave Transmission over Submerged Breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 115(5): 662-680.
- Lee, Man Seung. 2008. Wave Attenuation Effects due to Artificial Reefs Styles. Department of Coastal and Ocean Engineering. Master's thesis. Graduate School of Kwandong University.
- Nakamura, M., H. Shiraishi, and Y. Sasaki. 1966. Wave Dampening Effect of Submerged Dike. *Coastal Engineering*. 24.
- Nakayama, A. 1993. Experimental Study on Hydraulic Characteristics and Stability of Artificial Reef. *Proceedings of Coastal Engineering*. 40: 816-820.
- Tanaka, N. 1976. Effects of Submerged Rubble Mound Breakwater on Wave Attenuation and Shoreline Stabilization. *Proc. 23rd Jap. Coastal Engrg. Conf.* 152-157.
- Van der Meer, J. W. and I. F. R. Daemen. 1994. Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubble Mound Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.* 120(1): 1-19.

Korean References Translated from the English

- 이만승. 2008. 인공리프 형상에 따른 파고감쇠효과에 관한 연구. 관동대학교 석사학위논문.

Received: Jul. 18, 2016 / Revised: Aug. 6, 2016 / Accepted: Aug. 11, 2016

연안침식 방지를 위한 인공어초의 파고 감쇠효과

국문초록 해안 침식은 환경문제임과 동시에 사회적 문제 중 하나로 인식되고 있다. 해안 침식을 제어하기 위한 대응책으로서 방파제나 잠제, 인공어초 등이 그 활용 방안으로 떠오르고 있고, 실제로 이러한 구조물들은 파랑 에너지를 감소시켜 해안 침식을 방지하는 역할을 한다. 이러한 긍정적인 효과에 기초하여, 많은 잠제형 구조물들이 연안에 설치되고 있다. 이러한 해안 구조물의 파랑 에너지의 감소 효과를 살펴보기 위해, 파랑 전달률(K)과 Ursell 수, 파형경사 및 수심관련 매개변수들과의 상관성을 분석하였다. 본 실험은 파랑 에너지의 소산 효과를 나타낸다. 실험결과, 잠제에 의한 파고 감쇠율은 3열의 경우에 대해 최대 19.2%로 나타났다. 아울러, 파랑 에너지의 전달률은 Ursell 수에 의해 표현되는 실험식을 도출할 수 있다.

주제어 : 해안침식, 인공어초, 잠제, 파고 전달계수(전달률)

Profiles **Kyoung Ho Kim** : He received his B.S. M.S. Ph.D. in Eng. from Seoul National University, Korea in 1976. He is a Professor of the Department of Civil Engineering at Chungbuk National University, in which he has taught since 1980. His interesting subject and area of research and education is coastal hydraulics, wave mechanics, and coastal erosion & local scour(coastal@chungbuk.ac.kr).

Hyoun Sik Oh : He received his Ph.D. from Chungbuk National University, Korea in 2011. Currently he is working as general manager in (Corp)Nano E n C. His interesting subject and area of research and education is local scour in coastal and river, computational fluid dynamics, and Eng. Mechanics(octavius@nate.com).