

사석 방파제의 경사각에 따른 선단부에서의 국부세굴 특성*

Characteristics of Local scour at Trunk Section of a Rubble Mound Breakwater
with Inclined Slope

Kap Pil Cho**, Kyoung Ho Kim***, Hyoun Sik Oh

School of Civil Engineering, 208, E8-6, Chungbuk National University, 52 Naesudong-ro, Heungduk-gu,
Cheongju, Korea

Abstract

A breakwater is a structure protecting an area from wave action. Scour is one of the failure modes of breakwater. Soundings reveal large potential risks. Scour at rubble mound breakwater is caused by the steady streaming induced by the standing waves. The steady streaming depends on the angle of the breakwater slope, α , the incident wave height, H , the incident wave period, T , the water depth, h , the bed roughness characterized by the sand-grain size, d , the water density, ρ , and the water viscosity, μ . From dimensional analysis, the scour characteristics for the case of the no-suspension-mode transport can be found to depend on the KC number, h/L , α , Shields number, θ , L/d , Re number. The scour depth in the equilibrium scour phase were analyzed by non-dimensional parameters such these. Especially the scour depth have good correlation with the KC number which includes the Iribaren number

Key words: rubble-mound breakwater, local scour, KC number, Iribaren number

국문초록

방파제는 파의 작용으로부터 어느 한 영역을 보호하는 구조물이다. 세굴은 방파제 파괴 유형 중 하나이며, 조사에 의하면 세굴은 방파제에 대해 큰 잠재적 위험요소인 것으로 나타났다. 세굴은 중복파에 의해 유발되는 정상

* 본 연구는 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 일반과제 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

** Tel. +82-43-261-2226. E-mail. wonsaem@chungbuk.ac.kr

*** Corresponding author. Tel. +82-43-261-2402. Fax. +82-43-275-2377. E-mail. octavius@nate.com

Submission & Publication Process

Received: Sep. 15, 2014 / Revised: Oct. 23, 2014 / Accepted: Dec. 5, 2014

2차 흐름에 의해 발생한다. 정상2차 흐름은 방파제의 경사각 α , 입사파고 H , 입사파 주기 T , 수심 h , 모래입경 d 로 규정되는 바닥조도, 물의 밀도 ρ , 그리고 물의 점성계수 μ 등이다. 차원해석으로부터 비부유 이송방식의 경우 대한 세굴 특성은 KC number, h/L , α , Shields number θ , L/d , Re number의 함수가 됨을 알 수 있다. 특히, Iribaren 수를 포함하는 KC 수는 세굴심과 매우 양호한 상관성을 보여주었다.

주제어: 사석 방파제, 국부세굴, KC 수, Ursell 수, Iribaren 수

1. 서론

방파제는 외해에서 연안으로 침입하는 내습파를 제어하여 항만이나 배후지의 기능을 유지시킬 목적으로 건설되는 가장 보편적이고 중요한 연안시설물 중의 하나이다. 최근 들어서 지구 온난화에 의한 기상이변에 따른 초대형 태풍이 자주 발생되고 이에 따른 고파랑에 의해 연안구조물의 피해규모가 점차 증가하는 추세로서 주로 외곽시설인 방파제의 피해가 급증하고 있는 실정이다. 해양파랑에 의해 사석방파제의 선단부(trunk section, 방파제의 몸통 부분과 해저면 바닥이 접하는 부분)에서 발생하는 기초지반의 유실인 세굴은 방파제 파괴원인 중의 하나로, 최근 이러한 세굴로 인한 해안구조물의 파괴에 관심이 집중되고 있다. 그 동안 국내에서 방파제의 안정설계를 위한 연구들이 진행되어 왔으나 방파제 선단에서의 세굴에 대한 연구사례는 그 수가 많지 않다.

방파제 주변에서 발생하는 국부세굴에 대한 연구는 크게, 연직 방파제 와 사석 방파제의 제두부(toe, 외해로 향하는 방파제 끝부분)에서의 세굴과 선단부에서의 세굴 연구로 나눌 수 있다.

연직 방파제 제두부에서의 세굴의 경우 기본적으로 3차원 세굴이다. 이 경우 방파제 제두부는 방파제에 수직인 방향으로 진행하는 파의 작용을 받는다. 세굴은 파의 매 반주기동안 그 배후측에 박리화를 형성한다. 이러한 와들은 세굴과정에 있어서 중요한 역할을 한다. 이 주제에 대한 연구는 Sümer & Fredsoe(1997)를 비롯해서 Oumeraci(1994), Liu, *et al.*(1961) 등이 있다.

연직 방파제 선단부의 세굴에 대한 메커니즘은 2차원 세굴이라는 점에서 제두부에서의 세굴과 구별된다. 이 경우 진행파(입사파)가 벽에 부딪치면, 반사파가 외해방향으로 이동한다. 이 두 개의 파가 중첩되면 중복파가 형성된다. 이러한 중복파에 의해 재순환 셀(cell)들(저부와 상부에서 각각 형성, <그림 1>)로 구성되는 정상 2차 흐름장이 발생된다. 이러한 작용은 세굴과정에 있어서 중요한 역할을 한다(Carter, *et al.*, 1973, Mei, 1989). 또한 중복파를 만드는 2개의 진행파(입사파) 각각의 파고를 2배라고 보고하였다(Dean & Dalrymple, 1984, Section 4). Carter, *et al.*(1973)는 정선과 평행하게 발달하는 사주(sand bar)와 결부하여, 중복파 흐름장에서 세굴과 퇴적과정을 밝힌 첫 번째 연구자들이다. 연직 벽 방파제 전면에서의 2차원 세굴은 De Best, *et al.*(1971), Xie(1981; 1985), Irie & Nadaoka(1984), 그리고 Hughes & Fowler(1991)등에 의해 다루어 졌다. 이 저자들은 실험실과 현장에서 측정된 세굴에 대해 보고하고 있는데, 그 보고는 경사입사파가 작용하는 방파제(사석마운드 방파제를 포함)의 전면에서의 세굴과정의 다양한 형상들을 나타내고 있다.

사석 방파제 제두부 또는 선단부에서의 세굴에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. 사석 방파제 제두부의 경우 Stümer & Fredsøe(1997)는 사석방파제의 경우, 방파제 제두부의 KC 수 범위는 사실상 0에서 1사이 인데, 이것은 연직방파제의 경우와는 반대로, 이렇게 작은 값의 경우에는, 배류와가 형성되지 않는다고 보고하였다. 이들의 연구에서 2가지 주요한 메커니즘을 확인 하였는데, (1)방파제 제두부 주변의 바닥 위에서 발생하는 정상 2차 흐름과, (2)방파제 제두부에서 국부적으로 발생하는 권파라고 보고하였다. 권파에 의해 유발되는 세굴에 대한 연구는 Breusers and Raudvuki(1991), Stümer and Fredsøe(1997)등이 있다. 사석 방파제 선단부 세굴의 경우는 연직 방파제 선단부의 경우와 동일한 방식을 취하고 있고, 재순환 셀 시스템이 기본적으로 세굴과 퇴적 과정의 원인이 된다. 이러한 주제에 대한 연구는 Stümer & Fredsøe(2000)를 비롯해서 Hughes & Fowler(1995), Losada, *et al.*(1997) 그리고 Sutherland & O'Donoghue(1998)등이 있다.

본 연구에서는 방파제 안정성에 심각한 영향을 미치는 방파제 선단부에서의 세굴의 특성을 알아보기 위하여 30°와 40°의 경사를 갖는 사석 방파제를 대상으로 파랑 조건에서의 세굴 실험을 수행하였다. 규칙파 실험을 통해 사석방파제 선단부에서의 세굴 발생 경향을 파악하고, 세굴과 관련된 무차원 매개변수와의 상호관계에 기초하여 국부세굴 현상을 정량화 하는데 목적이 있다. 실험에 의한 경험식은 세굴로 인한 구조물의 안정 여부를 사전 예측함과 동시에 구조물 안전 대책수립에 도움이 될 것으로 판단된다.

II. 기본이론

1. 방파제 세굴의 기본 개념

해안에 구조물이 설치되면, 구조물 근방의 흐름 패턴을 변화시켜서 흐름의 축소, 구조물 전면부에서의 중복파와 하강류의 형성, 파의 반사 및 회절의 발생, 쇄파의 발생 등의 현상을 일으키게 된다. 이러한 현상들은 일반적으로 국부적인 유사수송 능력을 증가시켜서 세굴을 유발하게 된다. 따라서 국부세굴과 관련되어 있는 곳의 구조물의 형식은 상당한 변화를 받을 수 있다.

파랑의 환경에 노출되어 있는 구조물 주변에서의 국부적인 변화는 일반적으로 해저바닥의 전단응력과 난류강도의 증가에 의해 유사이송이 유발된다.

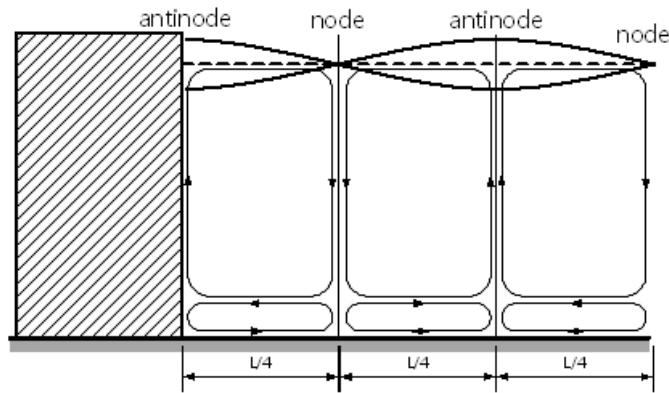
1) 세굴 과정

입사파가 벽에 부딪히면, 반사파가 외해방향으로 이동한다. 이 두 개의 파가 중첩되면 반사파가 된다(<그림 1>). 이러한 중복파의 수위변동은 다음 식으로 표현된다.

$$\eta(x,t) = \frac{2H}{2} \cos(kx) \cos(\omega t) \tag{1}$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \tag{2}$$

여기서 ω 는 각 주파수로서 $\omega = 2\pi/T$ 이고, k 는 파수로서 $k = 2\pi/L$ 이다. 이 때 T 는 파의 주기, L 은 파장 그리고 h 는 수심이다. 식에서 $2H$ 는 중복파의 파고로서 중복파를 만드는 2개의 진행파 각각의 파고(H)의 2배이다(Dean & Dalrymple, 1984). 이 중복파는 <그림 1>과 같이 재순환 영역들(저부 및 상부영역)로 구성되는 정상 2차 흐름장을 명확히 발생된다. 이러한 작용은 세굴과정에 있어서 중요한 역할을 한다. 저부영역의 경우는 바닥 경계층과 관련이 있다.



<그림 1> 방파제 선단부 정상 흐름(Sümer and Fredsøe, 2000)

※ 자료: Sümer & Fredsøe(2000).

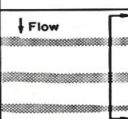
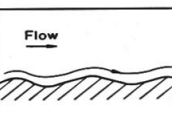
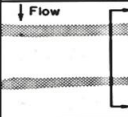
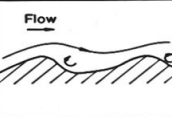
바닥 유사는 이러한 재순환 영역들에 대해 반응 한다. 모래 크기가 비교적 작으면, 모래는 파에 의해 교란되어서(파에 의해 유발된 위상분리 흐름 성분)에 의해 부유되어 더 높은 곳으로 운반되기 때문에 대부분 상부영역에 반응한다. 반면에 모래입자가 비교적 굵으면 모래는 부유하지 않는 영역내에서 이송되고, 주로 저부층의 영역에만 반응하게 된다. 또한 방파제의 길이를 따라 발생하는 질량수송의 존재는 추가적인 세굴을 유발할 것이고, 따라서 세굴심은 이 추가적인 효과에 의해 증가된다.

2) 피랑하에서의 해저면 형상 변화

해상에 설치된 구조물이 없을 경우라도 파나 흐름에 의해 해저 위를 흐르는 흐름은 규칙적이거나 불규칙적인 파형의 형태로 바닥을 변형 시키는데 사련의 형성이 대표적이다. 사련 현상은 정상흐름과 진동흐름 모두에서 관측된다. 바닥 근처의 흐름, 유사이송과 파고감쇠는 모두 바닥형상에 의해서 상당한 영향을 받기 때문에, 흐름과 유사의 간섭에 의해 생기는 바닥 형상들은 실제적으로 상당히 중요하다. 파의 주기 동안에 상당한 변화가 있기는 하지만 사련 형상은 근사적으로 정현파형상을 한다. 실제

로 사련의 파장 λ 에 대한 경계층 밖의 진폭 a 의 값인 a_r/λ 가 아주 작은 값인 경우에는 사련들은 발견되지 않지만, a_r/λ 의 값이 클 때 생기는 정상흐름은 유사하다. 이러한 정상흐름의 중요한 특징은 바닥의 아주 근방에서 정상류는 사련의 곡에서 사련의 봉을 향해 흐른다는 점이다. 따라서 유사 입자들이 그리 크지 않다면 바닥의 운동 중에 있는 유사는 사련의 곡에서 벗어나서 파의 봉 쪽을 향해 운반되는 경향을 갖게 될 것이다. 이러한 상황에서 사련은 성장하게 된다. 물론 사련들의 성장은 무한정으로 계속하지는 않는다. 유사 입자들을 사련의 파봉 방향으로 이동시키려고 하는 정상류의 경향에 대해서 반대로 경사의 아래 방향으로 중력성분이 작용한다. 사련의 경사가 커질수록 중력도 상대적으로 커져서 결국 그것을 초과하면 주어진 파의 조건에 대해서는 사련이 성장하지 않게 되는 한계 높이가 존재하게 된다.

Bagnold(1946)는 수평바닥에서 진행파의 작용으로 형성되는 바닥 형상들을 2개의 주요 그룹으로 분류하였다. 하나는 사련의 길이에 대한 높이의 비가 충분히 커서 사련의 정부의 흐름 방향 쪽에 와류를 형성하는 그룹인데 그는 이것을 와류 사련(vortex ripples)이라고 불렀고, 또 하나는 길이에 대한 높이비가 와류를 형성하기에는 너무 작은 그룹인데 그는 이것을 진동입자 사련(rolling grain ripples)이라 불렀다(<그림 2>). 본 실험에서의 사련의 형상은 와류 사련이다.

Bed form	Plan view	Cross section AA	Typical height-to-length ratios
Rolling-grain ripples			< 0.1
Vortex ripples (others names: 2-D vortex ripples; vortex ripples of 1st type; dunes)			0.1 - 0.25

<그림 2> 진동 흐름에 의한 형성되는 바닥 형상

※ 자료: Bagnold(1946).

3) 차원 해석과 무차원 매개변수의 도출

파랑의 경우 사석방파제 선단부 주변에서 발생하는 국부세굴은 다양한 변수들에 의해 영향을 받는다. 국부세굴에 영향을 미치는 변수들은 방파제 경사각(α), 입사파 파고(H), 입사파 주기(T)(또는 입사파 파장(L)), 수심(h), 모래입경(d)으로 규정되는 바닥조도, 물의 밀도(ρ), 토사의 밀도(ρ_s), 그리고 물의 점성계수(μ), 비교란시 바닥에서의 최대수립사 속도(U_m), 중력가속도(g) 등이 있다. 이 변수들 사이의 관계가 평형상태에 도달했을 때의 세굴심을 정의한다. 세굴은 또한 유사 특성에 의해서, 즉 모래입경(d_{50})과 모래입자의 수중비중 $\gamma_s - \gamma$ 에 의해서 변화한다.

차원해석으로부터, 비부유 이송방식(조립모래)의 경우에 대한 세굴 특성은 다음과 같은 매개변수들

의 함수가 되는 것을 밝힐 수 있다.

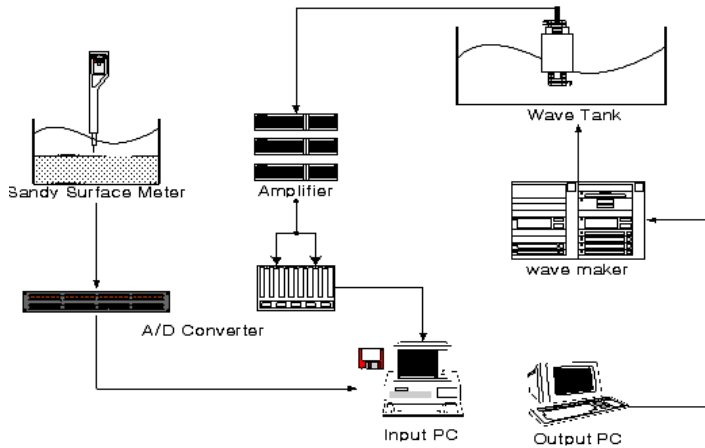
$$\frac{S}{H} = F(Re, \theta, \alpha, KC, L/d, h/L) \quad (3)$$

여기서, α 는 방파제 경사각, S/H 는 상대 세굴심, θ 는 Shields 수, KC 수, L/d 는 상대조도, h/L 는 파장에 대한 수심비(상대수심)이다. U_m 을 해저 바닥에서의 유속, a 는 비교란시 수립자운동의 진폭, L_r 은 사련의 길이라고 할 때, KC 수는 TU_m/L_r 이고 $Re = aU_m/\nu$ 로 표현된다.

III. 파에 의한 해저관로의 세굴실험

1. 실험장치의 구성 및 실험방법

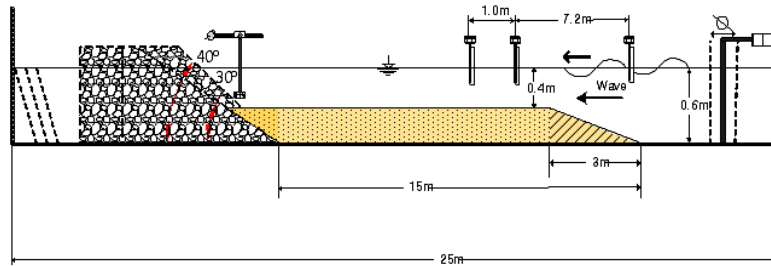
파랑상태에서 사석방파제의 선단부에서의 국부세굴과 사련형상을 측정하기 위하여 다음과 같이 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 깊이와 폭이 각각 1m, 0.8m이고 길이가 25m인 조파 수조에서 행해졌다.



<그림 3> 데이터 획득 및 조파 흐름도

외부 관찰을 위해 수조의 외벽은 유리로 제작되었으며 규칙 파는 piston형 조파기에 의해 형성된다. 방파제를 구성하는 사석의 평균 크기는 45mm이고, 바닥 재료는 중앙 입경 $d_{50}=0.27\text{mm}$, 균등계수 $C_u=1.67$ 인 모래를 채웠다. 이러한 재료들의 크기는 실제 시공되는 방파제와 사석의 기하학적 축척을 고려한 것이며 바닥 재료의 물리적 특성은 실험조건에서의 파랑 조건에 대해 비부유 상태에서의 세굴 모의를 위한 가능 최소 직경이다. Fig. 3은 자료의 획득 및 해석 과정을 나타낸 것이고 <그림 4>는

모형 실험의 모식도이다.



<그림 4> 실험장치의 구성

실험 조건은 <표 1>과 같이 실험은 파랑 하에서 방파제 경사각(α)와 주기(T), 파고(H)를 변화시켜, 총 18회의 실험을 수행하였다.

<표 1> 실험조건

사석 크기 $D(\text{mm})$	방파제 경사각	파의 주기 $T(\text{sec})$	파고 $H(\text{cm})$
45 mm	$\alpha = 30^\circ$ (1:1.75) $\alpha = 40^\circ$ (1:1.20)	1, 1.5, 2.0	5, 8, 5, 12

IV. 실험결과 및 고찰

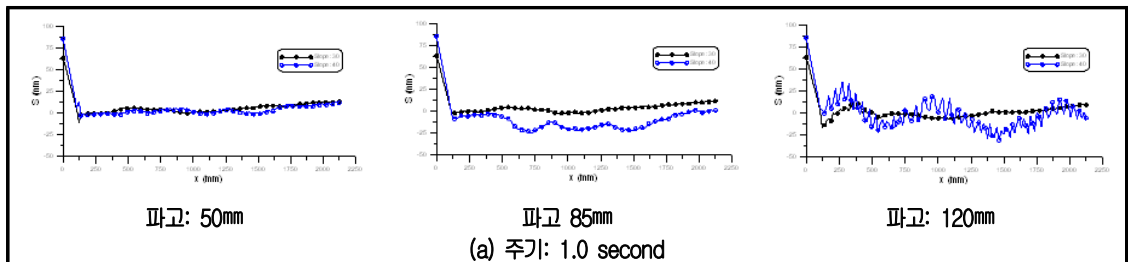
본 실험에서 경사 1:1.75의 경우와 1:1.2의 경우 입사파와 반사파로 인한 중복파의 발생으로 주기와 파고에 따라 배(anti node)부분의 변화로 인해 전자의 경우보다 후자의 경우 더 많은 양의 세굴이 일어난다. 즉, 방파제 경사각(α)이 클수록 세굴심이 증가하는 경향을 보인다. 본 실험에서 경사 1:1.75에서 Test No 1, 1:1.2에서 Test No 1인 경우 세굴은 발생하였지만, 사륜은 일어나지 않았다. 다른 모든 실험에서는 실험이 시작되고 얼마 지나지 않아 세굴과 사륜이 발생되었다. 세굴과 사륜의 특성은 파형경사와 수심에 의해 결정된다. 또한, 대부분의 실험과정에서 500~600개 정도의 파가 작용한 후 평형 세굴 단계에 도달하였다. <표 2>는 실험 결과로부터 획득한 기본 자료와 무차원 매개변수를 나타낸 것이다. 여기서 U_m 은 수립자의 바닥 속도이다.

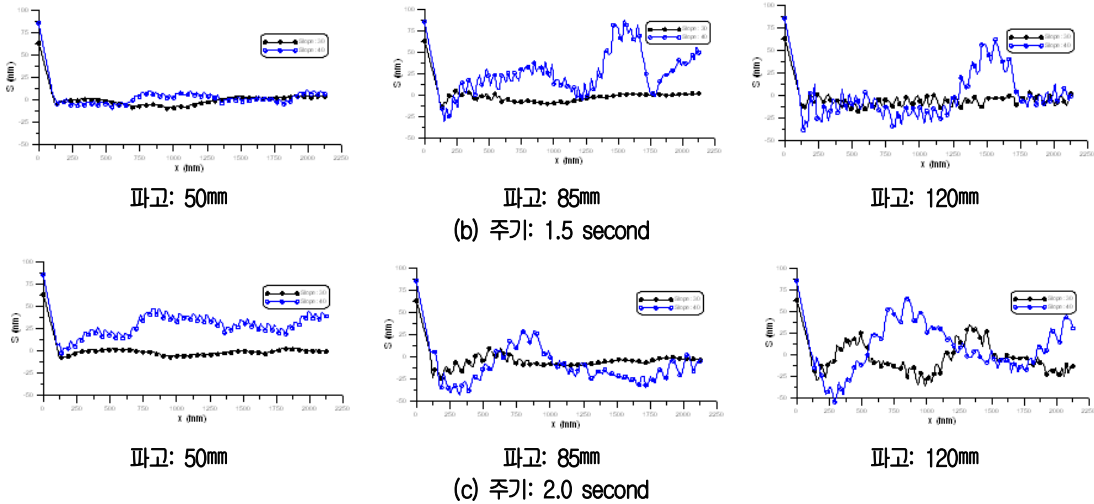
<표 2> 국부세굴 영향인자 (h=0.31m)

Test No.	slope	주기 (sec)	파장(m)	h/L	파고 (m)	U _m (m/s)	S/H	KC 수	lr 수
1	1:1.75	1	1.385	0.224	0.052	0.085	0.206	-	3.16
2					0.083	0.136	0.181	1.016	2.50
3					0.118	0.193	0.164	1.401	2.10
4		1.5	2.373	0.131	0.051	0.117	0.296	3.403	4.79
5					0.090	0.206	0.257	2.902	3.61
6					0.125	0.286	0.217	4.832	3.06
7		2	3.306	0.094	0.053	0.134	0.342	5.343	6.27
8					0.086	0.217	0.338	5.931	4.92
9					0.121	0.305	0.340	6.057	4.15
10	1:1.2	1	1.385	0.224	0.052	0.102	0.358	-	4.60
11					0.083	0.163	0.337	2.400	3.64
12					0.118	0.232	0.315	4.328	3.05
13		1.5	2.373	0.131	0.055	0.126	0.564	3.112	6.96
14					0.090	0.205	0.442	3.845	5.24
15					0.125	0.285	0.374	6.287	4.45
16		2	3.306	0.094	0.056	0.141	0.722	5.591	9.11
17					0.086	0.216	0.572	5.799	7.15
18					0.121	0.304	0.503	6.681	6.03

1. 방파제 경사각에 따른 세굴 단면의 변화

<그림 5>의 (a),(b),(c)는 경사각(1:1.75, 1:1.2)에 따른 평형 세굴 단면을 주기에 따라 각각 도시한 것이다. x는 왼쪽 방파제 선단부로부터 수평거리를, S는 세굴깊이를 나타낸다. 경사각이 큰 경우가 세굴심이 크게 발생하였으며, 세굴 단면의 변화 또한 크게 나타나고 있다. 단면의 변화에 영향을 미치는 주요 인자는 파고와 주기이며 경사가 큰 방파제일수록 파의 반사에 따라 큰 차이를 나타내었다. 또한 큰 경사를 갖는 방파제의 외해 쪽에서 와류사런(vortex ripple)이 뚜렷하게 나타났는데, 사런의 길이와 높이가 작은 경사를 갖는 경우에 비해서 상대적으로 큰 값을 갖는다.





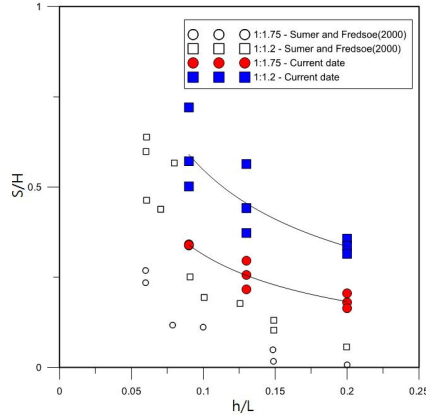
〈그림 5〉 방파제 경사각에 따른 바닥 형상

2. 무차원 매개변수에 따른 세굴심의 변화

1) h/L

차원 해석을 통해 도출된 무차원 매개변수 중 세굴에 직접적인 연관성이 낮은 Re 수와 Shields 수를 제외하면 세굴 특성은 파장에 대한 수심비(상대수심) h/L 과, L/d_{50} 의 함수로 표현될 수 있다. Xie(1981)의 세립모래에 대한 실험에서, L/d_{50} 이 증가할 경우 세굴심이 조금 증가하는 것으로 나타났으나 이러한 변화는 1차 근사 정도로 무시할 수 있다.

Fig. 6은 h/L 과 상대세굴심 S/H 와의 상관성을 분석한 결과로서, Sumer & Fredsoe(2000)의 투수성 사석 방파제 실험의 결과를 포함한다. 그림에서 알 수 있듯이 수심이 매우 클 경우 세굴심의 변화는 미미하게 나타났으며 이것은 파랑에 의한 에너지는 해저 바닥까지 도달하지 못하고 소산되기 때문이다. 반대로 h/L 이 증가할수록 상대 세굴심 S/H 는 매우 뚜렷한 변화를 보였다. 다만, Sumer들의 실험에서는 투수성 사석 방파제를 사용하였으나 본 실험에서는 방파제 내부에 차수 core를 설치하여 불투수성 방파제를 대상으로 했기 때문에 상대적으로 세굴심이 더 크게 나타났다.

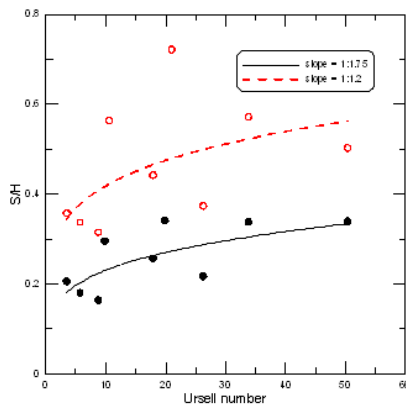


<그림 6> 상대 세굴심(S/H)과 상대수심(h/L)의 관계

2) Ursell 수(Ur)

파에 의해 해저에 전달되는 에너지를 나타내는 주요 인자로는 수심 h , 파고 H , 주기에 따른 L 이 있으며 상대수심(h/L)과 파형경사(H/L)의 조합으로 생각할 수 있으며 $Ur = HL^2/h^3$ 으로 계산된다. Fig. 7은 Ursell 수에 따른 상대 세굴심 S/H 의 관계를 도시한 것이다.

경사각이 30° (1:1.75)인 경우와 달리 상대적으로 40° (1:1.20) 경사각에서 큰 분산을 보이는데 Ursell 수가 증가할수록 분산 값은 더욱 크게 나타났다.

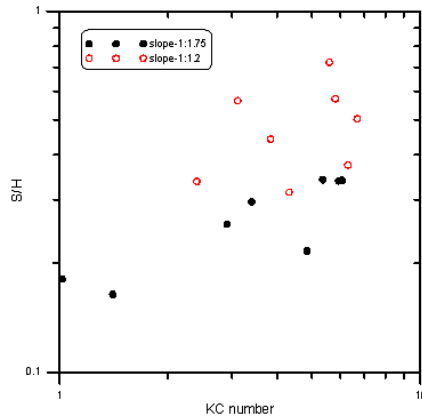


<그림 7> (상대 세굴심)S/H과 Ursell 수와의 관계

방파제의 경우 경사각에 따라 파는 굴절 혹은 반사되어 입사파와 부분 중첩이 되어 파는 큰 변형을 일으킨다. 경사각이 클수록 이러한 경향은 두드러지게 나타나며, 이러한 이유로 Ursell 수의 주요 변수인 H 의 큰 편차가 전체적인 상관성을 저하시키는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

3) KC 수

해저 바닥에서 파에 의한 정상 2차 흐름 과정을 설명할 수 있는 무차원 매개변수가 KC 수이다. KC 수는 파랑과 같은 진동형 흐름장에서, 구조물과 수립자의 이동범위에 대한 비로써 표현 가능하다. 이를 경사를 갖는 방파제에 적용하기 위해 사련의 길이 L_r 과 1주기 동안의 수립자의 이동거리 $U_m T$ 의 비($U_m T/L_r$)로 표현되는 KC 수를 도입하고 상대 세굴심 S/H의 관계를 경사각에 따라 구분하여 도시하였다(<그림 8>). 분석 결과, KC 수의 증가에 따라 상당한 분산 값을 보였으며 경사각이 클 경우 상관성은 더욱 약하게 나타났다. 해저면에서의 수립자의 이동 과정과 사련의 발생에 관한 명확한 관계가 미미하고 무엇보다 방파제로 인한 파의 변형에 대한 인자가 부재한 것이 가장 큰 원인일 것이다.



<그림 8> 상대세굴심(S/H)과 KC 수와의 관계

Sümer & Fredsoe(2000)는 경사에 따른 사석 방파제에서의 국부세굴에 관하여 실험한 결과와 Xie(1981)의 연직 방파제의 결과를 검토한 후 방파제 경사(α)를 고려한 함수 $f(\alpha)$ 를 제안하였다. 사용 가능한 방파제 경사각의 범위는 $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 이며, 연직 방파제에서의 $f(\alpha)$ 값을 0.3으로 하고 30° 경사에 대하여 0.2823의 값을 갖도록 취한다(<식 5>).

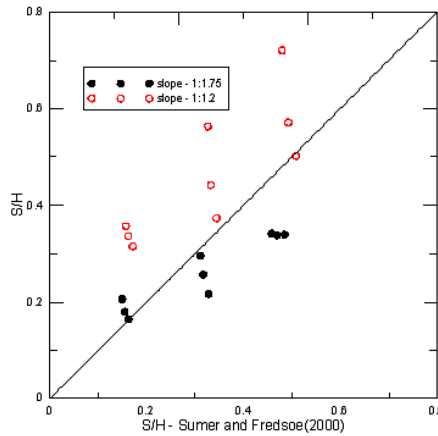
$$f(\alpha) = 0.3 - 1.77 \text{EXP}\left(-\frac{\alpha}{12}\right) \quad (4)$$

Xie의 경험식은 식 (5)로 표현되며 위의 식 (4)를 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{S}{H} = \frac{0.3}{\left[\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right]^{1.35}} \tag{5}$$

$$\frac{S}{H} = \frac{f(\alpha)}{\left[\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right]^{1.35}}, \quad 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \tag{6}$$

식 (6)과 본 연구 결과를 비교한 결과는 <그림 9>와 같다.



<그림 9> Sumer & Fredsoe의 실험식에 의해 계산된 상대 세굴심과 본 연구의 상대 세굴심(S/H)과의 비교

<그림 9>에서 알 수 있듯이 여전히 경사각 α 에 대하여 분산을 보이며 30°와 40°를 경계로 나뉘어 있다. Sumer & Fredsoe의 실험은 투수성 사석 방파제를 대상하였으며, 상대적으로 반사파의 영향을 고려하지 않았기 때문에 보다 큰 경사를 갖는 방파제에 대하여 분산이 크게 나타났다. 즉, 투수성 방파제는 파의 반사율을 감소(정상 2차 흐름의 발생을 막거나 감소)시켜 상대적으로 세굴심의 변동 폭이 작아지게 되고, 이에 따라 그 분산 역시 작게 나타난다. 따라서 반사율을 고려한 새로운 식을 고려할 필요가 있다.

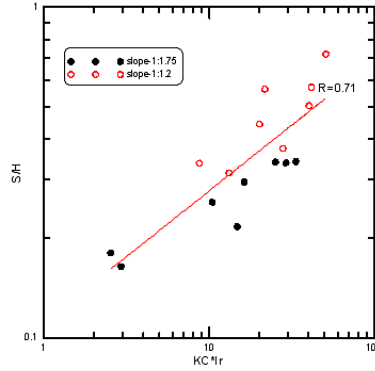
식 (7)은 Irribaren 수로서, 해양 파랑 현상을 설명하는데 사용되는 무차원 쇄파계수(surf similarity parameter)이다.

$$I_r = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}} \tag{7}$$

<그림 10>은 식 (7)을 KC 수와 곱하여 상대 세굴심과 상관성을 분석한 결과이다. 분석 결과는 결정계수 $R=0.71$ 이며 분석한 무차원 매개변수 중 가장 강한 상관성을 나타내었다. 위 도표를 회귀분석

한 결과는 식 (8)과 같다.

$$\frac{S}{H} = 0.11 (KC \cdot Ir)^{0.4} \quad (8)$$



<그림 10> 상대세굴심과(S/H)과 $KC \cdot Ir$ 와의 관계

위 분석 결과를 종합해 볼 때 경사를 갖는 사석 방파제에서의 세굴심은 해저 바닥에서의 수립자의 운동에 대한 진폭과 경사각에 따른 파의 반사와 밀접한 관련이 있으며, 파의 반사를 고려하기 위해 사용된 쇄파계수는 심해파의 파형경사와 방파제 경사의 비이며 파형경사가 크거나 입사파에 대한 구조물의 경사가 클수록 큰 값을 갖는다.

V. 결론

본 실험은 불투수성 사석 방파제 주변부에서 파랑에 의해 발생하는 퇴적과 침식 과정에 대하여 살펴보고 평형 세굴단면과 매개변수들 간의 연관성을 검토하기 위한 것이다. 특히 방파제 선단부에서의 최대 국부세굴심을 정량적화하기 위해 차원해석을 통한 무차원 매개변수들과의 상관성 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

동일 조건의 파랑이 작용할 경우 방파제의 경사각 클수록 세굴 단면 변화가 크게 나타났으며, 사면 간의 거리도 길게 측정되었다. 또한 방파제 선단부로부터 외해 방향으로 발생하는 사주는 방파제 경사가 클수록 크게 발달하였다. 이를 종합하여 판단할 때 세굴심의 크기는 주로 방파제의 경사각과 파고 및 h/L에 의해 결정된다고 할 수 있다. 실제 현장에서 시공되는 방파제가 일정 경사각을 취한다는 것을 고려했을 때 세굴심은 상대수심(h/L)만의 함수로 귀결된다.

해저 수립자의 케도운동이나, 주기와 파고 등과 같은, 파랑을 특정 짓는 물리량은 세굴심에 직접적인 영향을 주는데, 이를 대표하는 무차원 매개변수로서 KC 수와 Ursell 수를 주요 인자로 생각할 수

있다. 이들 무차원 매개변수들과 상대세굴심간의 상관성 분석 결과, 투수성 방파제에 비해 불투수성 사석 방파제에서 많은 분산을 보였다. 그러나 쇄파계수인 Iribaren 수와 KC 수와의 조합은 상대 세굴심과 가장 좋은 상관성을 나타낸 바, 이를 회귀 분석하여 최대 국부 세굴심을 산정할 수 있는 경험식을 도출할 수 있었다.

참고문헌

- Bagnold, R. A. 1946. Motion of Waves in Shallow Water. Interaction of Waves and Sand Bottoms. *Proc. Roy. Soc. Ser. A* 187: 1-15.
- Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi. 1991. *Scouring*. A. A. Balkema, Rotterdam. viii +143p.
- Carter, T. G., L. F. P. Liu, and C. C. Mei. 1973. Mass Transport by Waves and Offshore Sand Bedforms. *J. Waterways, Harbors and Coastal Engineering*. ASCE. 99(2): 165-184.
- De Best, A., E. W. Bijker, and J. E. W. Wichers. 1971. Scouring of Sand in Front of a Vertical Breakwater. Proc. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. *The Norwegian Institute of Technology*. 2: 1077-1086.
- Dean, R. and R. A. Dalrymple. 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Prentice-Hall, Inc: xi + 353p.
- Hughes, S. A. and J. E. Fowler. 1991. Wave-induced Scour Prediction at Vertical Walls. *Proc. Coastal Sediments*. 91(2): 1886-1900.
- Hughes, S. A. and J. E. Fowler. 1995. Estimating Wave-induced Kinematics at Sloping Structures. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ASCE. 121(4): 209-215.
- Irie, I. and K. Nadaoka. 1984. Laboratory Reproduction of Seabed Scour in Front of Breakwaters. Proc. 19th International Conference on Coastal Engineering. ASCE. 116(2): 1715-1731.
- Liu, H. K., F. M. Chang, and M. M. Skinner. 1961. *Effect of Bridge Constriction on Scour and Backwater*. Civ. Eng. Section, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, Report No. CER60HKL22: Prepared for Bureau of Public Roads under Contract CPR11-5480.
- Losada, I. J., R. Silva, and M. A. Losada. 1997. Effect of Reflective Vertical Structures Permeability on Random Wave Kinematics. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ASCE. 123(6): 347-353.
- Mei, C. C. 1989. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. *World Scientific*. xx + 740.
- Oumeraci, H. 1994. Review and Analysis of Vertical Breakwater Failure4s-lessons Learned. *Coastal Engineering*. 22: 3-29.

- Silvester R. and J. R. C. Hsu. 1989. Sines Revisited. *ASCE*. 115(3): 327-344.
- Sutherland, J. and T. O'Donoghue. 1998. Wave Phase Shift at Coastal Structures. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 124(2): 90-98.
- Stümer, B. M. and J. Fredsøe. 1997. Scour at the Head of a Vertical-wall Breakwater. *Coastal Engineering*. 29: 201-230.
- Stümer, B. M. and J. Fredsøe. 2000. Experimental Study of 2D Scour and Its Protection at a Rubble-mound Breakwater. *Coastal Engineering*. 40: 59-87.
- Xie, S. L. 1981. *Scouring Patterns in Front of Vertical Breakwaters and Their Influence on the Stability of the Foundations of the Breakwaters*. Report, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.

조갑필: 대전 한남대에서 공과대학 학사 졸업 후 충북대학교에서 공학석사 학위(논문: 사석방파제 트렁크 단면의 2차원 세굴 특성)하고, 현재 (주)K.C.C.에 재직 중이다(wonsaem@chungbuk.ac.kr).

김경호: 서울대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 쇄파후 파고감쇠 및 평균수위 변동에 관한 연구), 현재 충북대학교 토목공학부에서 교수로 재직 중이다. 관심분야는 해안세굴 및 표사, 파동역학과 해안수리, 등이며 주요 논문으로 “경사해빈에 설치된 해저관로의 국부세굴(2003)”, “파와 흐름에 노출된 관로 주변부 국부세굴에 영향을 미치는 매개변수(2012)” 등이 있다(octavius@nate.com).

오현식: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 천해역에서 파와 흐름에 기인한 해저관로 주변의 국부세굴 폭의 특성) 현재 충북대학교 토목공학부에서 강사로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 해안세굴, 하천구조물 설계, 생태 구조물 설계 등이며, 주요 논문으로 “3차원 CFD 모형을 이용한 원형 교각의 국부세굴 특성 해석(2008)”, “파랑하 해저관로 주변의 세굴폭에 영향을 주는 매개변수 분석(2009)” 등이 있다(lagoon55@naver.com).