

# 환형수조를 이용한 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 조사

An Investigation on Erosional Properties of Fine-Cohesive Sediments Using Annular Flume

○황규남<sup>1)</sup> · 소상돈<sup>2)</sup>

Hwang, Kyu-Nam · So, SangDon

## 1. 서론

미세-점착성 퇴적물에 대한 침식특성 조사를 위한 연구는 지난 수십 년 동안 많은 학자들에 의해 다양한 방법으로 수행되어져 왔다. 침식실험을 위한 수조로는 직선수조(straight flume), 환형수조(annular flume), 경주로 수조(race-track flume), 흔들수조 (rocking flume) 등 여러 종류가 있으나, 이 중에서 환형수조가 실험방법 및 결과의 타당성 등의 측면에서 가장 선호되는 실험장치로 알려지고 있다(Mehta and Partheniades, 1979; Fukuda and Lick, 1980; Maa, 1989; Krishnappan, 1993).

침식에 대한 최초의 연구들은 자연상태의 실트-점토의 저면 위로 일정한 염도를 갖는 해수를 재 순환시키면서 주로 직선수조에서 이행되었다(Alishahi and Krone, 1964; Dash, 1968; Thorn and Parsons, 1980; 김재중, 1989; 김차결 · 이종섭, 1992). 그러나, 모래나 자갈과 같은 비점착성 토사와는 달리 미세-점착성 퇴적물은 보통 점토를 다량 포함하는 무기성 광물(inorganic mineral)과 유기물(organic material) 및 생화학물질(biochemicals)의 혼합체이고, 입자간의 응집현상에 의해 그 제반 이동특성이 크게 변화하므로, 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 실험시에 직선수조의 사용은 그 타당성이 의문시된다. 보통, 플록(floc : 응집에 의한 미세 토사입자들의 결합상태)의 형태로 이동되는 부유토사는 그 응집력이 그다지 강하지 않으며, 직선수조에서 사용되는 재순환 펌프의 날개에 의해 응집된 부유토사들이 쉽게 분리될 수 있기 때문이다(Krishnappan, 1993). 더욱이 점착성 퇴적물의 이동 현상은 시간의 함수이며, 그 시간축적(time scale)은 수 시간에서부터 수일까지 변화한다. 따라서 이러한 시간축적에서 발생하는 현상을 조사하기 위해, 만약 직선수조가 이용된다면, 과도하게 아주 긴 수조가 요구되므로, 이는 매우 비현실적인 방법이라 할 수 있다.

과거 전통적으로 사용되어 온 직선수조의 이러한 단점을 보완하기 위하여 고안된 장치는 환형수조이다. 환형수조는 원형의 순환하는 수로를 가지며, 흐름은 수면에 밀착된 링의 회전으로 인한 마찰력에 의해 형성된다. 따라서, 환형수조는 재순환 펌프를 필요로 하지 않으며, 시간의 제약 없이 흐름조건을 동일하게 만들 수 있다는 큰 장점을 갖는다(Darland, 2000).

최근, 전북대학교 해안 · 항만실험실에서는 환형수조를 자체 제작하였다. 본 발표에서는 환형수조의 기본특성, 과거 연구사례, 및 흐름특성 등에 대해 논하고자 한다. 당초 본 연구는 군산해역에서 표본 채취된 갯벌 점착성퇴적물의 침식특성을 파악하기 위해 시작되었다. 미세-점착성 퇴적물의 침식 특성은 침식율(erosion rate)과 한계전단응력(critical shear stress)으로 표현된다. 현재 이들 인자들에 대한 이론적 · 해석적 해는 없으며 현장이나 실험실 실험을 통하여 측정하는 것이 최

1) 정회원, 전북대학교 토목환경공학부 · 공학연구원 공업기술연구센터 조교수

2) 학생회원, 전북대학교 공과대학 토목환경공학부 석사과정

선이다.

## 2. 환형수조의 기본특성

환형수조를 구성하는 2개의 주요 장치는 물과 퇴적물을 담을 수 있는 환형 모양의 수조와 수조내에 거치 되어 수면과 밀착될 수 있게 수조보다 약간 작은 폭을 갖는 환형의 상부 링(top ring)이다. 앞서 언급된 바와 같이 환형수조에서의 흐름은 기본적으로 수면과 접하여 회전하는 상부 링(top ring)의 마찰력에 의해 생성되며, 끝없이 순환되는 균일한 흐름을 만들 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 환형수조는 원심력과 원주속도(circumferential velocity)의 연직방향에서의 속도구배로 인한 2차 순환류(secondary flow)를 형성시켜(그림 1a 참조), 중심 축 방향에서의 바닥전단력(bed shear stress)을 비균등하게 하는 경향을 갖는다. 바닥전단응력은 보통 수조의 내벽(inner wall)에서부터 외벽(outer wall)으로 갈수록 증가하는 경향이 있으며, 이는 수조의 내측보다 외측에서 더 많은 침식을 유발시킬 수 있다. 2차 순환류의 발생을 저감시키기 위한 방안으로는 환형수조 물체를 상부 링의 회전방향과 역방향으로 직접 회전시키는 방법이 채택되어져 왔다(그림 1b 참조).

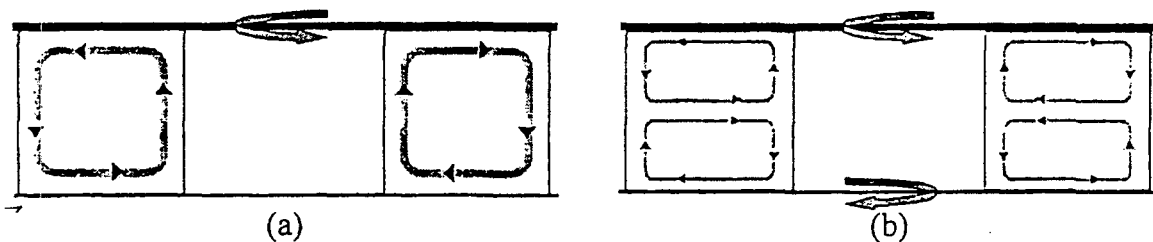


그림 1. 개념적인 2차 순환류의 흐름구조 (a) 상부 링 회전 (b) 양방향 회전

## 3. 환형수조를 이용한 과거 연구사례

### 3.1 흐름특성 연구

2차류를 포함한 환형수조 내의 모든 흐름은 침식을 야기하는 힘이므로, 그 상세한 흐름구조를 이해하는 것은 매우 중요하다. 과거 많은 연구가 환형수조 내에서 발생하는 흐름을 측정하기 위해 진행되어 왔다. Fukuda and Lick(1980)은 점착성 퇴적물의 연행부상(entrainment)에 대한 연구에서 hot film anemometry를 이용하여 상부 링이 회전하는 수조내의 원주속도를 측정하였다. 저면 경계층(bottom boundary layer) 근처에서는 고해상도의 측정이 이루어졌으며, 측정결과는 유효바닥전단응력(effective bed shear stress)과 상부 링의 속도가 대략적으로 선형관계인 것으로 나타났다. 한편, Graham et al.(1992)은 LDA(Laser Doppler Anemometry)를 이용하여 상부 링이 회전하는 수조내의 흐름장을 측정하였으며, 하상전단응력은 Hot-Film Stress Probe를 사용하여 측정하였다. 또한, Krishnappan(1993)은 LDA를 사용하여 상부 링만 회전하는 경우와 상부 링과 수조가 동시에 양방향으로 회전하는 경우의 흐름장에 대해서 상세한 측정을 하였다.

환형수조 내에서의 흐름특성은 또한 다양한 방법의 수치모형실험을 통하여 분석되어 왔다. Sheng(1989)은 적분경계층 모델(integral boundary layer model)을 이용하여 원주유속의 측정치로부터 방사상(radial) 유속을 산정할 수 있는 방법을 제시하였으며, Maa(1989) 또한 원통형 좌표계(cylindrical coordinate)에서 단순화된 Reynolds 방정식과 연속방정식을 사용하여 수치적으로 환형

수조 내의 2차 순환류를 모의하고 측정결과와 비교·분석한 바 있다. 한편, 상부 링만이 회전되는 경우에, 2차 순환류가 발생된다는 사실에는 논쟁의 여지가 없으나, 퇴적물 이동역학 측면에서의 그 영향의 정도에 대해서는 아직 많은 논란이 있는 상태이다.

표 1. 과거 제작된 대표적 환형수조의 규격 및 특성

수 조	R <sub>out</sub> (cm)	R <sub>in</sub> (cm)	H (cm)	Top	Bottom
Mehta (1973)	76	56	46	Rotating	Rotating
Fukuda (1980)	66	51	15		Fixed
Burt (1985)	300	260	10		Fixed
Maa (1989)	115	100	20		Fixed
Krishnappan (1993)	265	235	30		Rotating
Bailey-Darland (1999)	88	45	41		Rotating

현재 환형수조는 미국의 경우에 Florida 대학을 비롯하여 약 4~5개의 연구기관에서 보유하고 있으며, 유럽지역에도 약 3~4기를 보유하고 있으나 전북대학교의 환형수조를 제외하고는 국내에는 전무한 상태이다. 과거 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 연구를 위하여 사용되어 온 대표적 환형수조의 규격 및 특성은 표 1에 요약된다. 여기서 R<sub>out</sub>, R<sub>in</sub> 및 H는 각각 환형수조의 내·외측 반경 및 높이를 나타낸다.

### 3.2 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 연구

과거에 많은 연구가 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 해석을 위하여 환형수조를 이용하여 수행되었다(Partheniades, 1962; Mehta and Partheniades, 1979; Fukuda and Lick, 1980; Parchure and Mehta, 1985; Maa, 1989). 침식을 유발하는 원천적인 힘은 흐름에 의한 바닥전단응력(bed shear stress)  $\tau_b$ 라 할 수 있으나, 저면 퇴적물이 지니는 저항력(resistive force) 또한 침식의 정도를 조절하는 중요한 변수이다. 퇴적물이 갖는 이 저항력은 전단강도(shear strength)  $\tau_s$ 라 불리며, 그 크기는 광물질구성 성분, 함수비, 공극비, 염도, 그 형성과정 등에 따라 변화한다. 퇴적물의 전단강도는 종종 침식한계전단응력(critical shear stress for erosion)으로 표현되기도 한다.

환형수조를 이용한 침식실험으로부터 도출되는 전형적인 결과의 모식도는 그림 2에 주어진

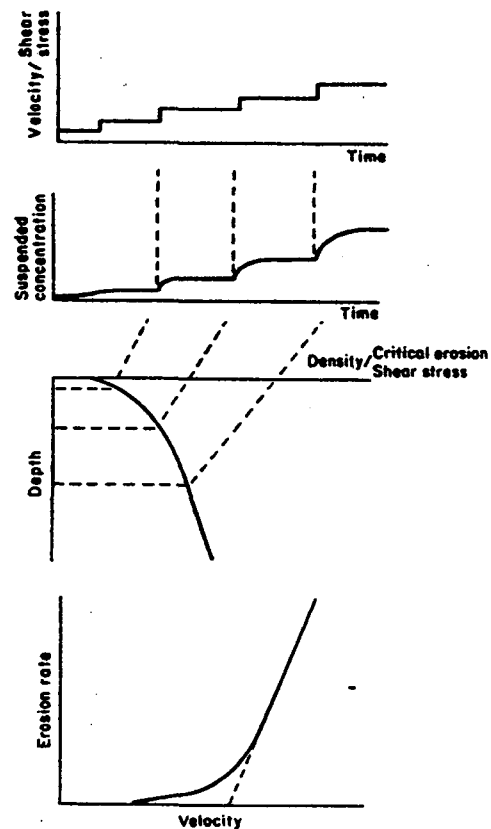


그림 2. 유속증가에 따른 저면 침식과 수층 부유사 농도의 변화(Dyer, 1986)

다. 수조에서의 유속이 조금씩 증가될 때, 저면 표층은 점점 침식되고 수층의 부유사 농도는 증가하게 된다. 그림 2에 도식된 바와 같이 유속이 증가된 초기에 부유사 농도는 급격히 증가하나, 점차적으로 그 증가율은 감소하게 되고 결국 일정한 값을 갖게 된다. 이러한 현상은 저면의 전단강도가 저면깊이에 따라 증가하여 유속에 의해 주어지는 바닥전단응력에 견줄 만큼 큰 전단강도를 갖는 깊이에서는 침식이 더 이상 진행되지 않기 때문이다. 계속적인 침식이 진행되기 위해서는 더 큰 유속 즉, 바닥전단응력이 주어져야 한다.

저면은 보통 퇴적저면(Deposited Bed), 균일저면(Placed Bed)의 두 종류로 구분되는데, 이들 사이에 중요한 차이점은 침식에 대한 점성강도의 수직분포에 있다(Mehta and Parchure, 1985). 전자의 구조는 나중에 퇴적된 유사는 응집력이 작은데 반해 먼저 퇴적된 유사는 그보다 더 크다. 대조적으로 후자는 수직방향으로 비교적 균일한 저면특성을 가진다.

충분히 압밀되어 단단하고, 비교적 균질(깊이에 따른 전단강도가 일정)한 저면에 대한 침식률(erosion rate)은 보통 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \frac{dm}{dt} = \alpha \left( \frac{\tau_b}{\tau_s} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서 침식률계수  $\alpha$ 는 침식률(단위시간당 단위면적에서 침식되는 토사량)과 동일한 단위를 가지며,  $\tau_b = 2\tau_s$ 일 때 침식률  $\epsilon$ 과 동일한 값을 갖는다. 침식률계수는 전단강도와 유사하게 광물질구성 성분, 함수비, 공극비, 염도, pH, 수온 등에 따라 변화하므로, 이 또한 "site specific"한 특성을 갖는다.

#### 4. 전북 대학교 환형수조

본 연구의 궁극적인 목적은 군산해역 미세-점착성 퇴적물의 침식특성을 파악하는 것이다. 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 조사는 환형수조를 이용한 침식실험을 통하여 수행되며, 실험결과로부터 침식률(erosion rate) 및 한계전단응력(critical shear stress)의 정량적 분석이 이뤄진다.

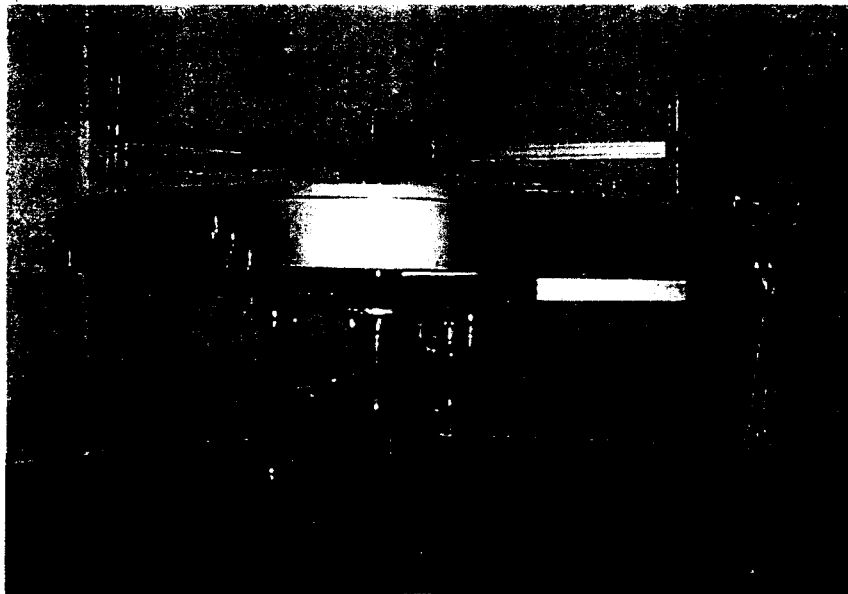


그림 3. 전북대 환형수조

침식실험을 위한 전복대 환형수조는 그림 3에 주어진다. 본 환형수조는  $R_{out}$ ,  $R_{in}$  및  $H$ 가 각각 115cm, 100cm, 20cm로 Maa(1989)의 환형수조와 동일한 규격을 갖는다. 그러나, Maa(1989)의 수조는 몸체는 고정(fixed bottom)되고 상부 링만 회전하는 수조인 반면에, 본 연구를 통하여 제작된 수조는 수조 몸체도 회전하는 양방향 회전수조로 설계되었다. 수조 본체와 상부 링은 모두 stainless steel로 제작되었으며, 상부 링은 그 높이를 임의로 조절할 수 있도록 제작되었다. 또한 수조 본체와 링은 각각 별개의 2개의 모터로 회전되며, 각각의 회전속도는 속도조절기 박스에 설치된 회전형 속도조절기로 조정된다. 수조 본체 측면에는 육안 관측을 위한 관측창이 설치되어 있으며, 높이에서 5cm 간격으로 경사지게 3개의 tap hose가 부착되어 있다.

## 5. 결론

본 연구의 최종 목적은 군산 해역 퇴적물의 침식 특성을 정량적으로 산정하고 그 값의 국소 지역에서의 공간적·계절적 변화를 파악하고자 하는 것이다. 점착성퇴적물의 침식특성은 입자간의 응집과 밀접한 관계가 있고, 응집 강도는 입경분포, 광물질 구성, 유기물 함량 등으로 묘사되는 퇴적물의 물리·화학적 특성과 염도, 수온 등으로 대표되는 해수의 특성에 따라 크게 좌우되므로, 본 연구에서는 이들 특성들에 대한 분석도 수행되고 있다. 환형수조는 현재 제작 완료상태이며, 고령토(kaolinite)를 이용한 예비실험을 수행한 후에, 군산항 점착성 퇴적물의 침식 실험이 수행될 예정이다. 구체적인 실험결과에는 아직 제시할 수 없지만 학술 발표회에서는 그 결과의 일부를 제시할 수 있을 것이다.

점착성 퇴적물의 침식특성은 "site-specific"한 특성을 가지므로 해당지역 퇴적물에 대한 침식 특성의 측정 없이 단지 수치모형시험만을 통한 침식률의 해석 및 예측은 무의미하다고 하겠다

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호; 2001-2-31100-002-3)지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 김재중 (1989). 점성토의 침식 및 퇴적에 관한 실험적 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
2. 김차겸·이중섭 (1992). 미세퇴적물의 부상특성에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 제12권 제3호, pp. 221-229.
3. Alishahi, M.R. and Krone, R.B. (1964). Suspension of cohesive sediments by wind-generated waves. Technical Report HEL-2-9, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.
4. Dash, U. (1968). Erosive behavior of cohesive soils. Ph.D. dissertation, Purdue Univ.
5. Dyer, K.R. (1986). Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley & Sons Ltd. Great Britain.
6. Fukuda, M.K., and Lick, W. (1980). The entrainment of cohesive sediments in freshwater. J. Geophys. Res. 85, 2813-2824.
7. Graham, D.I., James, P.W., Jones, T.E.R., Davies, J.M., and Delo, E.A. (1992). Measurement

- and prediction of surface shear stress in annular flume. *J. Hydraul. Eng.* 118, 1270-1286.
8. Krishnappan, B.G. (1993). Rotating circular flume, *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 119, No. 6, June.
  9. Maa, J.P.Y. (1989). The bed shear stress of an annular Sea-bed flume. *Proc. Water Quality Management*. Hamburg, Germany. pp. 271-276
  10. Mehta, A.J., and Partheniades. E. (1979). Kaolinite resuspension properties, *Journal of the Hydraulics Division*. Vol. 105, No. HY4, pp. 411-416.
  11. Parchure, T.M. and Mehta, A.J. (1985). Erosion of soft cohesive sediment deposits, *J of Hyd. Engineering*, ASCE, 111(10), pp. 1308-1326.
  12. Partheniades, E. (1962). A study of erosion of and deposition of cohesive soils in salt water. Ph.D. dissertation. University of California, Berkeley.
  13. Sheng, Y.P. (1989). Consideration of flow in rotating annuli for sediment erosion and deposition studies. *J. Coastal Research*, Special Issue, No. 5, pp. 207-216.
  14. Thorn, M.F.C. and Parsons, J.G. (1980). Erosion of cohesive sediments in estuaries: an engineering guide. *Proceedings of 3rd International Symposium on Dredging Technology*, Bedford, England, pp. 349-358.
  15. Yang, Z., Baptista, A., and Darland. J. (2000). Numerical modeling of flow characteristics in a rotating annular flume, *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 31, pp. 271-294