

홍수시 하천 퇴적물의 침식량 추정

정 태 성 (한남대학교 토목환경공학과 부교수)

1. 서 론

자연 하천에 존재하는 퇴적물의 이동은 홍수 및 수공구조물의 건설로 인한 침식 및 퇴적, 주로 홍수시 크게 발생하는 퇴적물 이동시 하상에 퇴적되어 있던 오염물질의 수중 유입으로 인한 수질오염 등과 관련하여 많은 조사가 수행되어 왔다.

자연하천에 존재하는 퇴적물은 조립질과 세립질로 구성되어 있으며, 특히 오염된 하천에서 세립질 퇴적물은 점착성으로 인하여 다량의 오염물질을 함유하고 하상에 퇴적되어 있다. 이러한 하상퇴적물은 홍수시 발생하는 큰 바닥마찰로 인하여 침식 및 부상하여 하천 수질을 크게 오염시키며, 홍수과와 함께 하류로 이동하여 저수지 또는 연안해역에 오염된 퇴적물을 퇴적시킨다. 이러한 퇴적물의 이동과정(그림 1)을 정확히 설명하고 규명하기 위해서는 퇴적물의 침식 및 퇴적, 이송-확산과정을 정확히 이해하는 것이 필수적

이다. 이와 관련하여 현장조사, 수리실험, 수치실험 등이 널리 수행되어 왔다. 특히, 퇴적물의 침식 및 퇴적에 관한 연구는 대부분 실험실에서 연구되어 왔으며, 수질오염과 밀접한 관계가 있는 점착성 세립퇴적물의 침식 및 퇴적현상과 관련하여 많은 현장조사, 수리실험, 수치실험이 최근에 수행되고 있다(Mehta 등, 1989a; 1989b). 그러나, 현재 퇴적물의 이동과정을 정확히 규명하고 예측에 활용할 만한 뚜렷한 연구결과를 얻지 못하고 있는 실정이다. 퇴적물 이동현상을 정확히 규명하지 못한 이유는 다음과 같다. 첫째, 기존 연구 및 실험이 현장에서 채취한 퇴적물 시료를 실험실에서 재구성하여 실험실에서 연구를 수행하여 현장상황을 잘 반영하지 못하였기 때문이다. 실제 하천에 자연상태로 존재하는 퇴적물과 실험실에서 재구성한 퇴적물의 침식특성은 상이하다. 둘째, 대부분의 연구가 표층퇴적물에 국한되어 추진되어 왔기 때문이다. 하천 퇴적물의 대부분은 홍수시 침식되며, 침식깊이는 수십 cm에서 수 m에 달한다. 따라서, 홍수시 발생하는 퇴적물의 침식현상을 정확히 규명하기 위해서는 현장 퇴적물을 교란되지 않은 (undisturbed) 상태로 홍수시 침식이 발생할 깊이까지 퇴적물의 침식특성에 관한 조사가 실시되어야 하천 퇴적물의 침식과정을 정확히 이해할 수 있다. 셋째, 하천 퇴적물은 다량의 오염물질을 함유한 점착성 퇴적물과 비점착성 퇴적물로 구성되어 있다. 그러나, 대부분의 연구는 점착성 퇴적물, 비점착성 퇴적물 각각에 대하여 독립적으로 조사되어 왔다. 따라서, 점착성 퇴적물과 비점착성 퇴적물이 혼합된 실제 하천

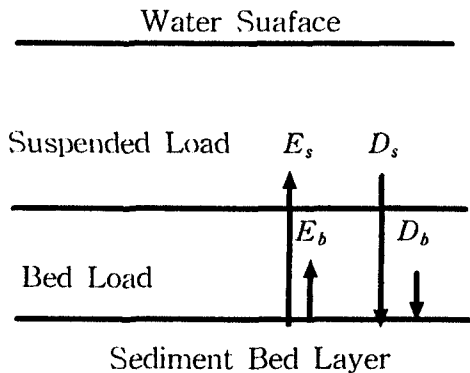


그림 1. 퇴적물 수송 모식도

퇴적물의 침식에 관한 조사가 필요하다. 넷째, 기존의 많은 연구가 홍수시와 같이 큰 바닥마찰응력이 작용하는 상황에 대해서 조사가 수행되지 않은 것도 침식현상을 제대로 규명하지 못한 이유이다. 하천의 경우 평상시는 거의 퇴적과 침식이 발생하지 않으며, 발생하더라도 그 양은 미미하다. 그러나, 홍수시는 하천에서 물의 유속은 평상시 보다 강하며, 이에 따라 큰 바닥마찰이 발생한다. 이는 하천 침식이 크게 발생하며, 바닥지형이 크게 변화한다. 따라서, 큰 마찰응력 작용시 퇴적물의 침식과정을 정확히 이해하는 것은 하상변동의 정확한 예측, 퇴적물 이동과정의 규명에 있어서 필수적이다.

본 글에서는 기존에 널리 사용된 현장 침식률 조사 방법에 대하여 문제점을 분석하고, 홍수시에 상응하는 큰 마찰응력 작용시 교란되지 않은 현장 퇴적물을 사용하여 측정된 침식률 조사결과를 소개하고자 한다. 또한, 새로운 방법으로 측정된 현장 침식률 결과의 활용을 통한 퇴적물 수송과정의 정확한 예측가능성을 살펴보고자 한다.

2. 현장침식률의 측정

하천 퇴적물의 수송은 물과 함께 움직이는 부유사의 이송-확산, 소류사 이동, 물과 퇴적물 경계층에서 퇴적물의 교환작용 등에 의존하며, 퇴적물 교환과 관련된 현상(침식, 퇴적, 응집, 침강 등)을 정량화하기 위한 많은 조사가 수행되어 왔다. 이러한 대부분의 조사 특히 점착성 퇴적물(입자직경 200 μm이하)에 관한 연구는 Annular Flume(그림 2)에서 수행되어 왔다(Mehta 등, 1989a). 이러한 연구결과에 의하

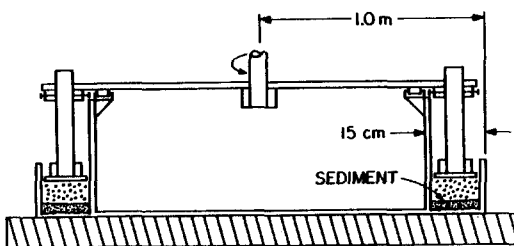


그림 2. Annular Flume의 예

면, 침식률 및 퇴적률은 퇴적물의 전체단위중량 (Bulk Density = 퇴적물의 총무게/퇴적물의 총부피), 입도분포, 유기물함유량, 화학적조성, 광물성 등에 의존한다고 알려져 왔다.

그러나, 순환수로를 사용하여 얻은 실험결과들은 제한점을 갖고 있다. 첫째, 대부분의 연구가 실험 장치의 제한성으로 바닥마찰이 1N/m²보다 작은 경우에 대하여 실험이 실시되었다. 홍수시 발생하는 하천에서 바닥마찰은 1N/m²이상으로 실험결과를 사용하여 홍수시 퇴적물 침식현상을 정확히 이해할 수 없다. 둘째, 실험에 사용한 시료들은 현장에서 채취한 퇴적물 시료를 실험실에서 재구성한 것으로 현장에 있는 퇴적물의 침식특성과는 다르다. 셋째, 침식과 퇴적이 혼합된 결과가 측정되어 각 과정을 별도로 이해하기 어렵다. 이중 현장시료가 아닌 실험실에서 재구성된 시료를 사용하는 단점을 보완하기 위하여 현장에서 채취된 시료를 교란하지 않고 사용할 수 있는 Shaker(그림 3)라는 장치가 개발되어 사용되어 왔다. 그러나, 이 방법은 자연하천에서는 물의 순환이 수평적으로 발생하는 데 반하여 격자의 연직운동에 의해 전단을 발생시키고 그 결과를 순환수로결과와

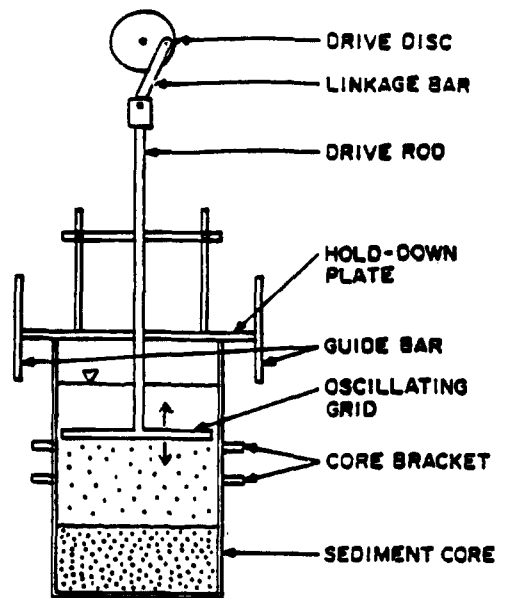


그림 3. Shaker의 예

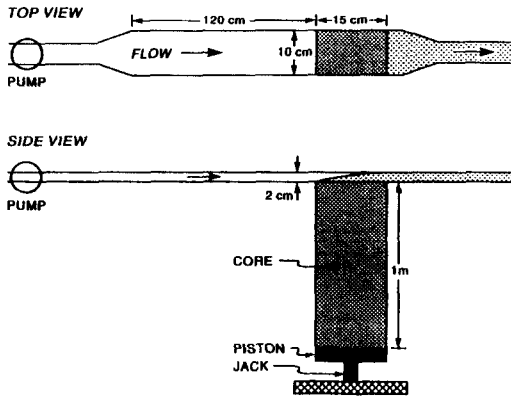


그림 4. SEDFLUME의 제원

연결하는 방법으로 순환수로가 갖는 문제점을 가지고 있다.

비점착성 유사는 점착성이 없어 입자간에 작용하는 힘은 중요하지 않아서 점착성 유사에 비하여 운동역학이 간단하여 비교적 많은 부분이 규명되어 있으며, 개수로 및 자연하천에서 많은 연구가 수행되어 왔다(van Rijn, 1984a; 1984b; 1984c). van Rijn은 소류사와 부유사로 분류하여 기존의 연구결과들을 수집하여 재정리하고, 수송량에 대하여 정리하였다.

자연하천에 존재하는 퇴적물은 점착성 퇴적물과 비점착성 퇴적물이 혼합된 상태로 존재한다. 홍수통과시 하천유속은 증가하며 이에 따라 세립질 퇴적물은 대부분 하류로 이동하며, 이로 인해 조립질 퇴적물만 하천에 남게된다. 이러한 현상을 장갑화(Armoring)이라고 한다. 홍수가 끝난 후 평상시에는 유속이 감소하고, 이에 따라 세립질 퇴적물이 하천 바닥에 퇴적한다. 따라서, 하천에 존재하는 퇴적물은 이러한 과정의 반복으로 점착성과 비점착성 퇴적물이 공존하며, 퇴적층의 입자분포 및 압밀특성에 따라 침식률이 변화한다. 따라서, 하천에서 퇴적물의 침식 및 퇴적현상을 정확히 이해하기 위해서는 점착성 및 비점착성 토사가 혼합된 퇴적물의 수송특성을 파악해야 한다. 이러한 퇴적물의 침식률을 측정할 수 있는 장치가 최근에 미국 캘리포니아대학에서 개발되었다. SEDFLUME(그림 4)으로 명명된 이 장치는

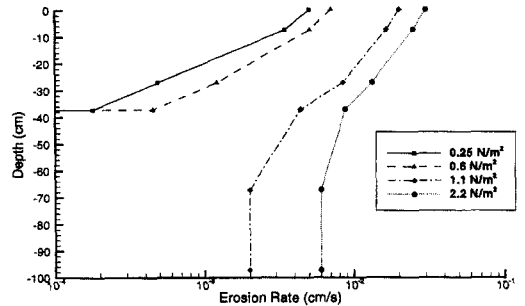


그림 5. 깊이별 퇴적물의 침식률

점착성 및 비점착성 퇴적물의 침식률은 바닥마찰응력이 10N/m^2 이 넘는 경우에 대해서도 침식률을 측정할 수 있어 홍수시와 같이 유속이 크게 작용하는 경우에 유용하게 활용될 수 있다. 또한, 현장퇴적물을 1m이상의 길이로 코아링한 교란되지 않은 퇴적물 시료에 대한 침식률을 바로 측정할 수 있어 비교적 현장 퇴적물의 침식과정과 유사하게 침식률을 측정할 수 있다. 이는 기존 방법들이 현장에서 시료를 채취한 후 실험실로 이동하여 퇴적물 시료를 재구성한 후에 순환수로 또는 Shaker에서 침식률을 측정하는 것에 비하여 현장에서 교란되지 않고 채취한 시료를 사용해서 수심별 순침식률을 바로 측정한다. 실험방법은 다음과 같다. SEDFLUME에 펌프를 사용하여 물을 흘려보내에 따라 퇴적물 시료의 표면에 마찰응력이 발생된다. 이에 따라 코아시료의 상부는 침식되기 시작한다. 침식이 되면 수로바닥과 코어시료가 수평을 유지하기 위하여 코어속 시료를 위로 이동시킨다. 이러한 과정을 통하여 주어진 바닥마찰응력하에서 임의 깊이 퇴적물의 침식률을 측정하게 된다. 그림 5는 미국 위스콘신주에 있는 Lower Fox River에 채취된 현장코아시료를 사용하여 침식률을 측정한 결과이다. 사용된 코아시료의 입경은 대부분 0.5 mm이하 입자로 비점착성 퇴적물과 점착성 퇴적물이 혼합되어 있다. 수심과 바닥마찰응력에 따라 침식률이 변하고 있음을 보여준다. 전반적으로 깊이가 증가함에 따라 침식률은 감소하고, 바닥마찰응력이 증가함에 따라 침식률이 증가한다. 이외에도 SEDFLUME을 사용하여 침식률에 영향을 주는 것

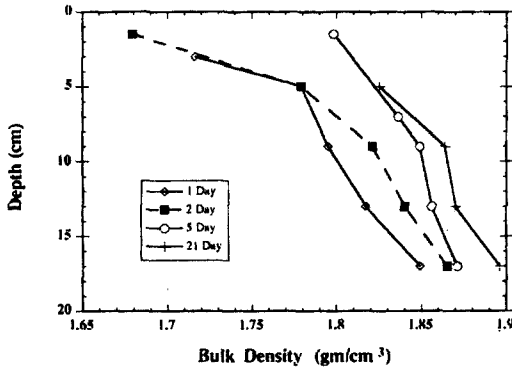


그림 6. 압밀기간별 전체단위중량의 수심변화

으로 알려진 전체단위중량, 입도분포, 화학성분, 광물성분 등의 영향이 조사되었다(Jepsen 등, 1997; McNeil 등, 1996). 그림 6은 미국 Santa Barbara Channel에서 채취된 시료를 재구성하여 일정기간 압밀한 후 측정된 전체단위중량의 수심변화를 나타낸다. 전체단위중량이 전반적으로 퇴적층 수심이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보이며, 압밀기간이 길어짐에 따라 전체단위중량이 증가하고 있다. 그림 7은 전체단위중량과 침식률과의 관계를 나타낸다. 전체단위중량이 증가함에 따라 침식률이 감소하는 경향을 보였다. 이상과 같은 결과에 의하면 침식률은 바다마찰응력과 전체단위중량과 다음 관계가 있다 (Roberts 등, 1998).

$$E = A \tau^a \rho^b \quad (1)$$

여기서, E는 침식률(cm/sec), τ 는 바다마찰응력, ρ 는 퇴적물의 전체단위중량, a와 b는 퇴적물의 특성에 의존하는 상수이다.

그림 8은 퇴적물 입자크기별로 전체단위중량과 침식률의 관계를 조사한 결과이다. 입자크기가 작은 점착성퇴적물의 경우는 전체단위중량의 변화에 따라 침식률이 크게 변하는 모습을 보이고 있으나 입자크기가 큰 비점착성퇴적물(입자크기 222 μm 이상)은 침식률이 전체단위중량에 영향을 받지 않았다. 이상과 같은 결과로부터 점착성토사의 침식률은 압밀기간에 영향을 받으나 비점착성퇴적물(모래, 자갈)은

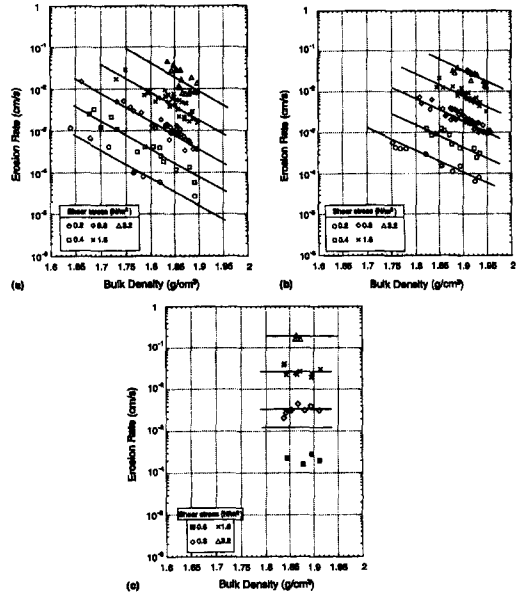


그림 7. 전체단위중량과 침식률의 관계: (a) 14.8 μm , (b) 75 μm .

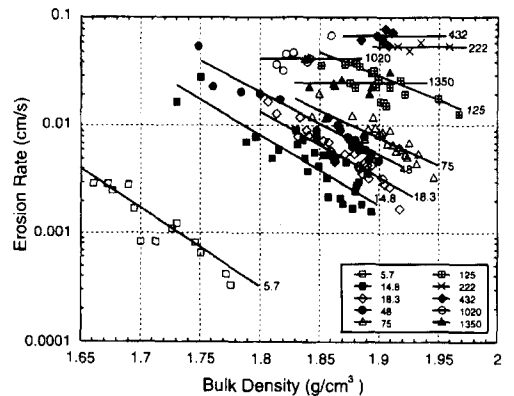


그림 8. 입자크기별 전체단위중량과 침식률의 관계

압밀기간과 거의 관계가 없음을 알 수 있다. 실제 하천에 있는 퇴적물은 점착성과 비점착성 퇴적물이 혼합되어 존재하며, 따라서 전체단위중량이 침식률에 영향을 미칠 것이다. 그림 9는 전체단위중량이 1.85 g/cm³인 퇴적물의 입자크기별 침식률을 측정된 결과이다. 세립질 퇴적물의 경우는 입자크기가 증가함에 따라 침식률이 증가하는 모습을 보이며, 조립질 퇴적물의 경우는 입자크기가 증가함에 따라 침식률이 감소하는 모습을 보인다. 이는 세립질 퇴적물은

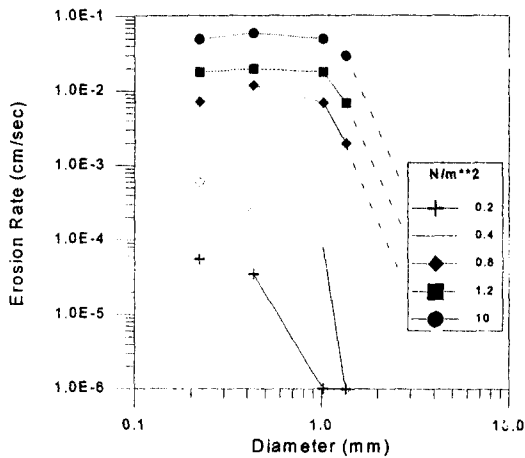


그림 9. 입자크기와 침식률의 관계

입자크기가 증가함에 따라 점착력이 감소하여 침식률이 증가하는 것이며, 조립질 퇴적물은 입자크기가 증가함에 따라 퇴적물의 무게가 증가하여 쉽게 침식되지 않기 때문이다.

침식률에 영향을 미치는 한계침식응력은 하상에 있는 퇴적물이 움직이기 시작할 때의 전단응력으로 주로 정의된다. 이와 관련하여 많은 연구자들은 점착성 토사에 대한 한계침식응력을 조사하였으며, 그 결과는 조사자들에 따라 다르다. 전반적으로 입자크기가 작은 점착성 입자의 경우는 입자크기가 감소함에 따라 한계침식응력이 증가하며, 비점착성 입자의 경우는 입자크기가 증가함에 따라 침식전단응력이 증가한다. 이는 입자크기별 침식률 변화와 동일한 양상이다. 그러나, 특별히 관심을 가져야 할 사항은 점착성 입장의 경우 전체단위중량이 한계침식응력에 큰 영향을 미친다는 것이다. 한편, 비점착성 퇴적물의 한계침식응력은 퇴적물 입경과 한계침식응력사이 관계를 나타내는 Shields곡선 등을 사용하여 구할 수 있다. 이상과 같은 결과를 볼 때, 자연하천에 있는 오염된 퇴적물의 침식률은 전체단위중량과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 전체단위중량은 퇴적물의 연직 위치에 따라 다르다.

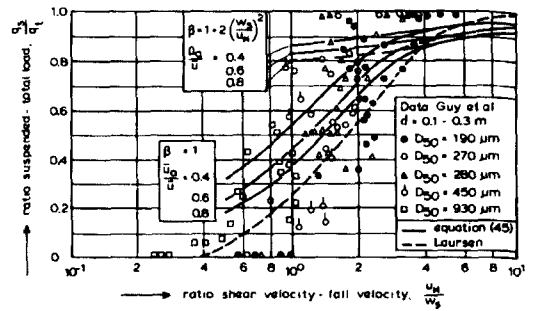


그림 10. 부유사 수송량과 소류사 수송량의 비 (van Rijn, 1984b)

3. 현장침식량의 예측

바닥경계층에서 퇴적물의 이동은 하상으로부터 침식과 물속에 존재하는 퇴적물의 퇴적에 의하여 발생한다. 침식된 퇴적물의 수송은 크게 물과 함께 움직이는 부유사와 바닥경계를 따라 물의 움직임보다 느리게 움직이는 소류사로 구분할 수 있다. 부유사는 물 속에 존재하는 난류가 퇴적물 입자의 무게보다 클 때 발생한다. 대체로 입자크기가 200 μm보다 작은 경우는 부유사로 주로 이동하며, 큰 경우는 부유사와 소류사로 이동한다(그림 10). 이에 따라 침식된 유사의 일부는 소류사로 일부는 부유사로 이동할 것이다. 현재 현장시료의 교란되지 않은 상태로 직접 채취 및 실험으로 현장퇴적물의 침식률에 관한 자료를 비교적 정확히 측정하였다. 이 측정된 결과를 사용하면, 홍수시 발생하는 하상 침식률을 비교적 정확히 추정할 수 있을 것이다. 그러나, 추정을 정확하게 하기 위해서는 이와 관련된 나머지 현상들(퇴적, 이송, 확산 등)도 정확히 이해되어야 할 것이다. 또한, 침식된 퇴적물의 소류사와 부유사로 분리과정에 대해서는 정확하게 이해하지 못한다. 이에 대한 연구가 필요하다. 이와 관련하여 소류사 수송량과 부유사 수송량의 비에 관한 연구결과는 일부 알려져 있다(van Rijn, 1984b). 이 외에 소류사 및 부유사의 퇴적과정에 대해 정확히 이해하지 못하고 있다. 이러한 현상은 물의 난류운동과 밀접한 관계를 가지고 있다. 퇴적물은 다음과 같이 일반적으로 퇴적물의 농도, 침강속도, 퇴적확률과 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

$$D = P w_s C \quad (2)$$

여기서, D는 퇴적률, P는 퇴적확률, w_s 는 퇴적물 입자의 침강속도, C는 퇴적물의 농도이다.

퇴적은 바닥마찰응력이 퇴적한계응력보다 작은 경우에 발생하며, 퇴적확률은 점착성 퇴적물의 경우는 일반적으로 바닥마찰응력에 반비례하고(Ariathurai 와 Krone, 1976), 비점착성 토사의 경우에는 난류 운동과 관련되어 있는 것으로 알려져 있다(Gessler, 1967). 침강속도 경우 단일입자로 존재하는 토사의 경우는 비교적 잘 알려져 있으나, 덩어리(floc) 형태 점착성 토사의 경우는 잘 규명되지 못하고 있다. 이와 관련하여 외국의 경우는 연구가 활발하게 진행되고 있으나 국내에서는 미비한 실정으로 이에 대한 지속적인 관심 및 연구가 요구된다.

4. 결론 및 제언

홍수시 발생하는 대량 침식현상과 관련된 요소들에 대하여 실험결과를 기초로 살펴보았다. 현장에서 교란되지 않고 채취된 퇴적물 코아시료와 실험실에서 재구성된 퇴적물 시료를 사용하여 실험한 결과에 의하면, 퇴적물의 침식은 입도분포, 퇴적물의 깊이,

퇴적물의 전체단위중량과 밀접한 관계를 가지고 있었다. 특히, 점착성 토사의 경우 전체단위중량의 변화에 따라 침식률이 크게 변화하였다. 그러나, 비점착성 토사의 침식률은 전체단위중량과 관련성이 미약하였다. 그러나, 실험을 위해 현장에서 수집한 오염된 퇴적물은 대부분 점착성과 비점착성 퇴적물이 혼합되어 있었으며, 퇴적물의 깊이에 따라 전체단위중량이 변화하고 침식률이 또한 변화하였다. 우리나라 하천과 폐쇄성 연안해역의 경우 대부분 수질오염으로 고통을 받고 있다. 특히 하천바닥에는 많은 오염된 퇴적층이 존재하고 있으며, 오염된 퇴적물은 홍수시 발생하는 큰 유속으로 인하여 침식되어 하류로 이동하며, 궁극적으로 저수지, 연안해역 등에 퇴적하여 지속적인 수질오염원이 되고 있다. 국내의 경우 많은 저수지가 식수원으로 사용되고 있으며, 저수지의 수질은 날로 악화되고 있는 실정이다. 저수지 수질오염은 오염된 하천으로부터 오염된 퇴적물의 유입 및 저수지내 퇴적현상과 밀접한 관계가 있다. 따라서, 하천에 있는 오염된 퇴적물의 홍수시 침식량을 정확히 추정하고, 이를 토대로 토사의 저수지 유입에 대한 방지대책을 적절히 수립하여 저수지 수질을 최적으로 관리 및 개선하는 것이 양질의 수자원을 안정적으로 확보하기 위하여 시급히 요구된다. ●

〈참고문헌〉

- Ariathurai, R. and Krone, B.K., 1976. Finite element model for cohesive sediment transport, *J. of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 102, No. HY3, pp. 323-338.
- Gessler, J. (1967). The beginning of bedload movement of mixtures investigated as natural armoring in channels, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Translation T-5.
- Jepsen, R., Roberts, J., and Lick, W. (1997). "Effects of bulk density on sediment erosion rates." *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 99, 21-31.
- McNeil, J., Taylor, C., and Lick, W. (1996). "Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 6, pp.316-324.
- Metha, A., Hayter, E.J., Parker, W.R., Krone, R.B., and Teeter, A.M. (1989a). "Cohesive sediment transport. I: Process description." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 8, pp. 1076-1093.
- Metha, A., Mcanally, W.H, Hayter, E.J., Teeter, A.M., Schoellhamer, D., Heltzel, S.B., and Carey, W.P. (1989b). "Cohesive sediment transport. II: Application." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 8, pp. 1094-1112.
- Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D. and Lick, W. (1998). "Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 12, pp. 1261-1267.
- van Rijn, L.C. (1984a). "Sediment transport, Part I: Bed load transport." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 10, pp. 1431-1456.
- van Rijn, L.C. (1984b). "Sediment transport, Part II: Suspended load transport." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 11, pp. 1613-1641.
- van Rijn, L.C. (1984c). "Sediment transport. Part III: Bed forms and alluvial roughness." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 12, pp. 1733-1754.