

점착성 하상재료를 가진 수로에서의 국부세굴 평가

최계운*, ○김기형**

1. 서론

세굴은 물의 흐름작용을 통해 하상에 작용하는 마찰속도 또는 전단력의 변화에 따라 하상재료의 제거(침식)에 의한 흐름단면의 확대현상이며 이로 인하여 물과 경계를 이루는 입자에 대한 전단력과 소유력은 지속적으로 변화되게 된다. 따라서, 세굴현상은 흐름상태 및 유사의 수송능력에 따라 좌우되며 하상재료의 특성에 따라 세굴양상은 변화하게 된다. 일반적으로 점착성 하상에서의 세굴양상과 비점착성인 사질토 하상에서의 세굴양상은 서로 다른 것으로 알려져 있으나, 국내의 경우 점성토 하상위에 교각 설치등으로 인한 세굴 심도등을 검토할 때 사질토 하상에서 개발된 세굴 공식을 그대로 적용하는 경우가 많이 있다.

따라서, 본 연구에서는 점착성 하상재료를 가진 수로에서의 국부세굴을 평가하기 위하여 점착성 하상재료와 사질토 하상재료와의 차별성과 점착성 재료에서 국부 세굴에 영향을 미치는 인자들을 도출하여 이에대한 영향을 규명하고자 하였다.

2. 사질토(충적하상) 수로에서의 세굴양상

사질토 하상을 가진 수로의 경우, 하상재료에 점착성이 없기 때문에, 국부 세굴에 영향을 주는 인자들은 점착성 하상재료를 가진 수로에서의 인자들과 다를 수밖에 없다. 사질토 하상에서의 세굴은 크게 정적세굴과 동적세굴로 구분하기도 하고 수축세굴, 국부세굴, 장기간의 하상변동으로 나누기도 한다. 이 중에서 국부 세굴이 발생하는 이유는 구조물 설치에 따른 단면축소로 인하여 급작스런 흐름의 가속과 구조물 전,후면에서 충돌하는 물의 흐름으로 인한 와류의 발생이다. 이 와류의 활동은 하상재료를 침식하여 하상재료를 처음의 위치에서 다른 곳으로 이동시킨다. 만약, 국부적인 지역에서 유사가 이동하는 양이 그 지역으로 유입되는 유사량보다 많을 경우 세굴공은 발달하게되며 세굴심이 증가함에 따라 와류의 강도는 감소한다. 따라서, 유사이동량은 감소하게 되고 하상의 평형상태가 이루어진다.

비점착성인 사질토 하상에서의 국부세굴에 영향을 미치는 인자는 기본적으로 와류의 형성이며, 이 와류는 유체의 특성, 하천의 흐름변화, 하상재료의 다양성 및 교각의 형상등에 영향을 받는다. 따라서, 교각주변에서의 세굴에 영향을 주는 인자를 하상재료 외적 인자인 유체의 특성인자, 하천내의 흐름인자, 구조물의 형태인자와 하상재료 인자로 구분하여 볼 수 있다. (Richardson, 1990; Molinas et al., 1989; Melville, 1984; Breusers, et al., 1977; Laursen, 1952 등)

* 인천대학교 토목공학과 교수

** 인천대학교 토목공학과 석사과정

2.1. 하상재료 인자에 따른 세굴 양상

하상재료는 비점착성 하상재료와 점착성 하상재료로 크게 분류되는데 점착성인 경우와 비점착성인 경우에 따라 그 특성이 서로 다르며 비점착성 하상재료는 입자의 크기, 입도분포, 하상재료의 밀도등이 유사이동에 지배적인 인자이다. 정상류에 있어서 사질토 하상재료의 크기는 국부 세굴심에 대한 영향을 그대지 크지 않은 편이며 특히, 큰 입경의 하상에 있어서 최대세굴심은 입경의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 사질토 하상재료의 입도분포는 정적세굴의 최대세굴심에 영향을 크게 미치나 동적세굴의 최대세굴심에 미치는 영향은 크지않다. 또한 하상재료의 밀도에 대하여는 하상재료의 밀도가 감소할수록 세굴심은 증가한다고 알려져 있다.

2.2. 하상재료 외적인 인자들에 따른 세굴 양상

하상재료 외적인 인자들로는 수심, 유속, 구조물의 형상, 크기, 접근각도등이 있다. 세굴심에 대한 수심의 영향에 있어서는 일정한 값의 U_c/U_{*c} 에서 수심이 아주 큰 경우는 수심에 대한 영향이 무시될 수 있지만 일반적으로 수심이 증가할수록 세굴심도 증가하며, 상류(常流)에 있어서 Fr수의 증가에 비례하여 세굴심이 증가하나 Fr수가 0.8이상인 경우에는 오히려 세굴심에 감소하는 경우도 발생하고 있다. 구조물의 형상은 세굴심에 큰 영향을 미치며, 교각의 경우 타원형 교각은 사각형 교각에 비해 세굴심이 20~30%정도 감소하고 반원형 교각은 10%정도 세굴심이 감소한다. 또한 교각의 크기가 클수록 세굴심이 증가하며 흐름의 접근각도가 30° 정도 발생하면 세굴심은 약 2배 정도 증가하는 것으로 알려져 있어 흐름의 접근각도가 세굴에 주요한 인자로 알려지고 있다.

3. 점착성 하상재료에서의 세굴 양상

비점착성인 사질토 하상에서의 하상재료 인자는 하상을 이루는 재료가 점착성이 없는 사질토이기 때문에 그 특성을 해석하기에 다소 단순한 반면, 점착성 하상재료의 세굴에 관한 연구는 하상재료에 대한 인자의 특성이 매우 복잡하고 해석이 어렵기 때문에 비점착성 하상재료의 세굴양상 연구에 비하여 많은 연구가 수행되지는 않았으나 ASCE의 세굴위원회(1968), Paaswell(1973), Raudkivi(1976, 1982), Croad(1981), Steven과 James(1982)등과 최근 Nagy(1995)에 의해 점착성 하상에서의 세굴양상이 연구된 바 있다. Raudkivi(1984)에 의하면 점착성 하상재료의 침식은 한계유속, 침식지수(erodibility index), 점토의 강도등에 관계가 있으며, 일반적으로 점착성 하상재료를 가진 수로등에서의 국부 세굴은 전단강도, 소성지수, 함수비, 유속 및 시간의 변화, 점토 함유율, 염도등과 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

3.1. 전단 강도에 따른 세굴 양상

점착성 하상에서의 세굴은 하상재료의 전단강도에 크게 영향을 받는 것으로 나타나고 있으며 점착성 하상재료의 전단강도는 점착력과 내부마찰각 및 유효응력에 따라 변화하며 이는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_v = C + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

여기에서, S_v , C , σ , ϕ 는 각각 전단강도, 점착력, 유효응력, 내부마찰각을 나타낸다.

한편, Sundborg(1956)는 하상재료의 이동에 저항하는 힘을 하상재료의 전단강도에 비례하는

것으로 나타내었으며, Dunn(1959)은 점착성 하상재료의 침식에 있어서 한계 소유력은 하상재료의 전단강도에 따라 변화되는 것으로 가정하였고 한계 소유력을 전단강도와 하상재료의 입도분포에 따른 관계로부터 계산하는 식 (2)를 제안하였다.

$$\tau_c = 0.02 + \frac{S_v \tan \theta}{1000} + 0.18 \tan \theta \quad (2)$$

. 여기서, τ_c , S_v , θ 는 각각 한계소유력, 전단강도, 경사를 나타내는데, 경사 θ 는 0.06mm보다 가는 입자의 비율(%)과 소성지수와의 선형관계에서 얻도록 하고 있다.

식 (2)에서 보는 바와 같이 전단강도가 증가할수록 한계 소유력이 증가하여 동일한 하상재료의 이동을 위하여는 소유력이 커져야 하므로 동일한 수심, 유속등에서는 세굴심도가 작아질 수밖에 없다. 그림 1은 Espey(1963), Rektorik, Smerdon(1964)에 의한 실험결과를 나타내고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 전단강도가 증가할수록 한계 전단력이 증가하는 것을 알 수 있으며 이것은 전단강도가 증가함에 따라 한계 소유력이 증가하는 것을 의미하므로 점착성 하상재료를 이동시키기 위하여는 수류의 소유력이 증가되어야 함을 의미하고 있다.

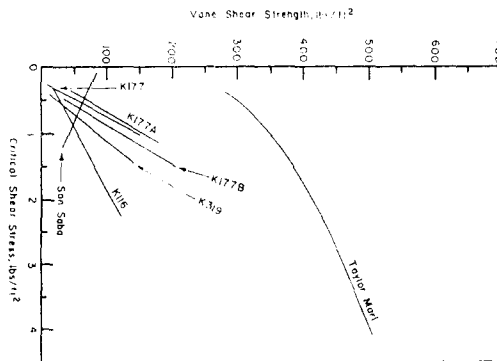


그림 1. 전단강도 변화에 따른 한계 전단력의 변화

3.2. 소성지수 크기에 따른 세굴양상

점착성 하상재료의 특성은 소성지수의 크기로도 나타낼 수 있고, Smerdon과 Beasley(1959)는 수로특성과 에너지 경사로부터 계산된 한계 소유력은 소성지수와 관계가 있다는 것을 밝혔으며 이는 식 (3)과 같이 표현된다. 소성지수는 점토의 점착력을 나타내는 지수로 소성지수가 증가한다는 것은 점토에 있어서 점성이 증가한다는 것을 의미한다. 즉 소성이 증가하면 점착력이 증가하고 이는 전단력을 증가시켜 한계 소유력을 크게하므로 세굴의 발생을 억제한다는 것으로 이해할 수 있다.

$$\tau_c = 0.0034(PI)^{0.84} \quad (3)$$

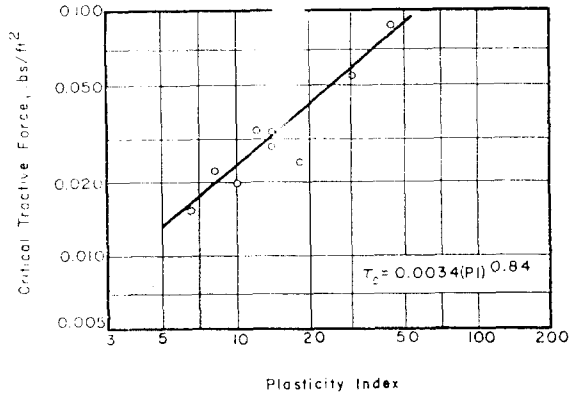


그림 2. 소성지수와 한계 소유력의 관계(Smerdon과 Beasley이후)

3.3. 함수비

함수비가 점착성 하상의 세굴에 미치는 영향은 아직 확실하게 규명되지는 않았으나, 함수비는 흙입자의 특성을 나타내는 가장 기본적인 인자의 하나로 Terzaghi(1975)는 점토특성에 있어 물의 영향이 매우 중요하다고 하였다.

한편, Enger(1957, 1964)는 전단력이 한계상태에 도달하여 재료가 침식되기 시작할 때까지 재료에 대하여 경계 전단력을 가하는 실험을 수행하였는데 이 실험에서 침식을 유발하기 위해 필요한 하상에 작용하는 전단력은 흙이 다짐된 상태에서 함수비의 함수라는 것을 밝혔다. 또한 Shaikh(1986)는 포화된 흙과 포화되지 않은 흙은 서로 다른 침식양상을 보인다고 하였다. Espey(1963), Rektorik, Smerdon(1964)는 한계 소유력에 대하여 함수비의 영향을 알아보기 위하여 함수비 변화에 대한 실험을 실시하여 함수비가 증가할수록 한계 소유력은 감소하는 경향이 있는 것을 알았다. 그 결과는 그림 3에 나타나 있다.

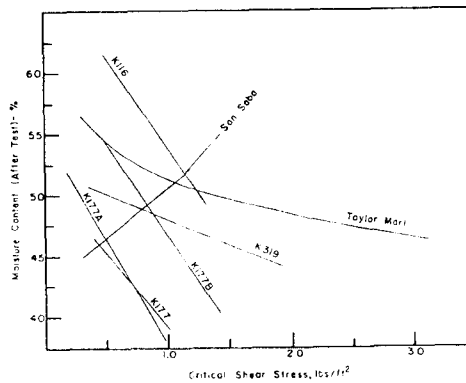


그림 3. 함수비 변화에 대한 한계 전단력의 변화

3.4. 시간에 따른 세굴 변화

유속이 증가할수록 세굴은 더욱 증가하고 세굴이 진행됨에 따라 일정한 시간이 경과하면 세굴

의 깊이가 가장 깊어지는 최대 세굴심이 발생하는데 HEC-18(1995)에서는 사질토의 경우는 최대 세굴심에 도달하는 시간이 1시간 이내로 짧은 동안이지만 점착성이 있는 하상의 경우는 최대 세굴심에 도달하는 시간이 작게는 수일에서 길게는 수년까지 소요된다고 하였다. 또한, Abedel-Rahman(1962, 1963)은 점토하상의 특성을 알아보기 위한 실험에서 유속분포와 하상이 침식하는 깊이를 시간과 부유사량의 함수로 생각하였다. Kelly와 Gularte(1981)는 그림 4에서와 같이 세굴 초기에는 세굴심도의 변화가 급하고 점차로 완만해지는 경향을 보이기는 하지만 시간에 따라 유사량이 계속적으로 증가하는 것으로 나타내고 있다.

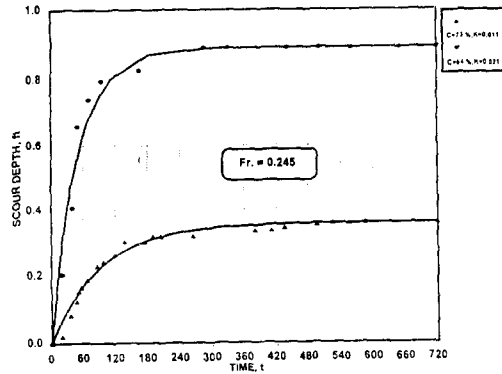


그림 4. 시간에 따른 세굴심의 변화

3.5. 점토 함유율에 따른 세굴의 변화

하상이 비점착성일 경우에 점착성을 지닌 재료가 유입되면 하상의 특성은 변화하게 된다. 일반적으로 충적토에서 점토의 함유율이 10%정도만 변화되어도 그 특성이 많이 변하기 때문에 점토의 함유율은 매우 중요한 인자이다. 점토 함유율이 변화하면 점착력과 관련된 소성지수가 변화하기 때문에 이는 하상재료의 소성지수와도 관련이 있다. Nagy(1995)는 점토의 함유율에 따라 함수비가 세굴에 큰 영향을 미친다고 가정하여 점토의 함유율 변화에 따른 세굴실험을 통하여 그림 5와 같이 점토의 함유율이 증가할수록 세굴심은 적게 발생한다고 하였다.

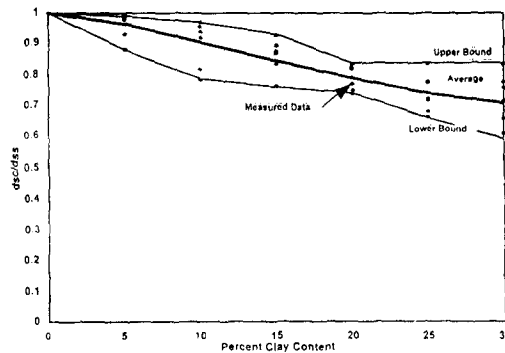


그림 5. 점토의 함유율에 따른 세굴심의 변화

3.6. 염도의 변화에 따른 세굴양상

점착성 하상에 있어서 염도의 변화 역시 중요하게 작용하는데 염이 추가되면 이온들이 입자들 주위에 있는 2중층을 억제하는 경향이 있고 이는 입자들 상호간의 반발력을 감소시켜 Van der Waal's Force를 증가시킨다. 따라서 염의 농도가 증가 할수록 하상재료의 전단강도는 증가하게 된다. 또한 이온이 변화하면 이에따라 압자에 작용하는 전기적인 성질이 변화하기 때문에 점착성 하상재료의 전단강도에도 변화가 발생한다. 그림 6은 염도의 변화에 따른 하상재료의 평균 전단강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7은 함수비와 염도의 변화에 따른 전단강도의 변화를 나타내는 것으로 염도에 따라 평행한 관계를 나타내고 있다. 그림 8은 단위 면적당 응집입자의 수와 전단강도의 관계를 나타낸 것으로 응집입자는 염도에 따라 변화하며 응집입자의 수가 적을수록 전단강도는 감소한다.

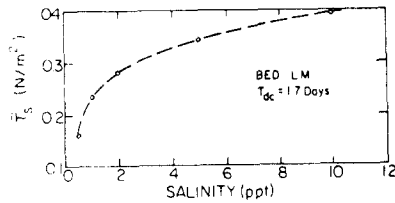


그림 6. 염도 변화에 대한 평균 하상 전단력의 변화

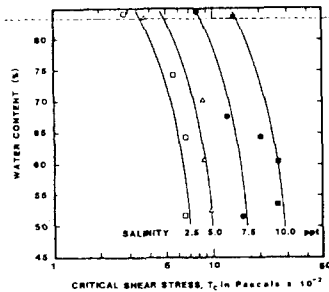


그림 7. 함수비와 염도에 대한 한계 전단력의 변화

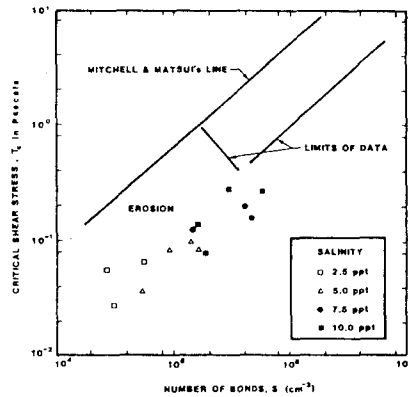


그림 8. 염도와 응집입자에 대한 전단강도의 변화

4. 결론

하상에서의 세굴현상은 매우 복잡하여 여러 가지 변화인자에 따라 세굴양상이 변화하게 된다. 이러한 인자들에는 유체의 특성인자, 하천내의 흐름인자, 하상재료의 인자, 교각의 형태인자등이 있으며 특히, 하상재료가 점착성이 있는 점토인 경우에는 전단강도에 영향을 미치는 특성이 사질토 하상에서 보다 매우 다양하게 변화하기 때문에 세굴현상을 해석하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 이와같은 점착성 하상에서의 세굴현상을 규명하기 위하여 전단강도, 소성지수, 함수비, 지속시간, 점토 함유율, 염도등에 따른 국부세굴현상에 대하여 연구하였다.

점토를 많이 함유하여 소성지수가 커질수록 점착성이 증가하고 전단강도가 증가하여 하상입자

를 이동시키기 위한 한계 소유력도 함께 증가하므로 동일한 유속과 수심에서 침식은 발생량이 감소하며 최대 세굴심에 도달하는 시간이 모래하상과는 달리 상당히 오랜 시간에 걸쳐 있는 경향을 보이고 있다. 전단강도의 경우 하상재료의 전단강도가 증가할수록 세굴심은 감소하고 있으며, 소성지수가 증가할수록 점착력이 증가하여 세굴 발생이 감소하고 함수비의 영향은 확실하게 규명되지는 않았으나 세굴심은 함수비가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다. 또한 지속시간은 모래하상의 경우와 달리 평형상태에 도달하는 데에는 상당히 오랜 시간이 소요된다. 점토 함유율은 소성지수에 영향을 미치므로 소성지수가 증가할수록 세굴심은 감소하며 염도의 증가는 입자의 응집력에 영향을 주어 세굴심을 감소시킨다.

따라서 점착성 하상재료를 가진 수로에서의 세굴을 예측하는 경우에는 점착성 재료의 특성을 반영할 수 있는 세굴공식을 적용하는 등의 좀더 신중한 해석이 요망된다.

5. 참고문헌

- Arithurai, R. and Arulanandan, K., (1978). Erosion Rates of Cohesive Soil. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 104, No. HY5, pp. 279-283.
- Arulanandan, K., Gillogley, E., and Tully, R., (1980). Development of a Quantitative Method to Predict Critical Shear Stress and Rate of Erosion of Natural Undisturbed Cohesive Soils. Technical Report No. GL-80-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- FHWA, (1995). Evaluating Scour at Bridges, Publication No. FHWA-IP-90-017.
- Kelly, W. E. and Gularte, R. C. (1981). Erosion Resistance of Cohesive Soils. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 107, No. HY10, pp. 1211-1224.
- Nagy Girges Reiad Yakoub, (1991). Effect of Cohesion on Bridge Abutment Scour, Ph. D. Dissertation, Colorado State Univ., Collins Co.
- Parchure, T. M. and Melita, A. J., (1985). Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 10, pp. 1308-1326.
- Partheniades, E., (1971). Erosion and Deposition of Cohesive Materials. *River Mechanics*, Vol. II, Chapter 25. H. W. Shen, Editor.
- Passwell, R. E., (1973). Causes and Mecanisms of Cohesive Soil Erosion. : The State of the Art. Special Report 135, Highway Research Board, National Research Council, pp. 52-74.
- Raudkivi, A. J., and Tan, S. K., (1984). Erosion of Cohesive Soils. *Journal of Hydraulic Research, International Association for Hydraulic Rsearch*, Vol. 22, No. 4, pp. 217-233.
- Smerdon, E. T. and Beasley, R. P., (1961). Critical Tractive Force in Cohesive Soils. *Agricultural Engineering*, Vol. 42, pp. 26-29.
- 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, (1993). “교각주위에서 세굴심도 영향인자의 민감도에 대한 실험적연구”, 한국수문학회, 제35회 수공학연구발표회 논문집, pp. 81~88.
- 오정희, (1996). Y형 교각에서의 세굴심도 및 배후 하상변화에 관한 실험적 연구, 인천대학교 토목공학과.
- 최계운, 김기형, 서병하, (1996). “하천내 연속교량 설치에 따른 세굴심도 변화”, 대한토목공학회 학술발표회 논문집(II), pp. 107~110.