

# 점탄소성 모형을 이용한 연안하상 및 해저 점토퇴적층 거동모의



**박용성** |  
Cornell University  
Research Associate/Instructor  
yp54@cornell.edu

유사이동은 수리학의 중요한 연구분야다. 유사는 유변학(rheology)적 특성에 따라 크게 비점착성유사(모래)와 점착성유사(진흙)로 구분할 수 있는데, 후자보다는 전자에 대해서 보다 활발한 연구가 이루어져 왔다. 그런데 최근 들어 점착성유사에 대한 관심도 부쩍 높아졌다. 미국의 예를 들자면, 미국토목학회(ASCE)에서 점착성유사의 역학적 특성과 측정, 그리고 관리에 관한 특별연구위원회를 편성하여 그 결과를 2007년도에 발표하였고(McAnally et al. 2007a,b), 미국해군연구소(Office of Naval Research, ONR)에서는 연간 수백만불에 달하는 연구비를 이 분야의 연구에 투자하고 있다(<http://www.ce.jhu.edu/~dalrymple/MURI>). 또한 2004년도에 발생한 동남아시아 지진해일 현장조사 결과 상당량의 점토퇴적층이 관찰되었는데, 이와 관련하여 과거에 형성된 퇴적층을 통하여 그 지역의 지진해일 빈도수 및 특성을 밝히려는 연구가 활발히 진행되고 있다(<http://earthweb.ess.washington.edu/tsunami2/deposits/>). 즉, 연안 및 해안 시설물의 유지관리와 재해방지 차원에

서 점착성유사에 관한 기본연구의 필요성이 부각되고 있다.

연안 및 해안 지역에서 점착성유사의 역학적 특성으로 널리 알려진 것 중 하나가 탁월한 파랑에너지 감쇄작용이다. 멕시코만에 위치한 Mud Hole은 특히 유명한데, 폭풍우 속에서도 이 지역의 파도는 늘 잔잔해서, 어부들이 비상대피처로 이용해 왔다고 한다(Gade 1958). 많은 학자들이 이러한 현상을 이론적으로 설명하고자 시도해 왔지만, 점착성유사의 거동특성을 완벽하게 규명하기란 쉬운 일이 아니다. 가장 큰 어려움은 진흙의 유변학적 특성이 매우 복잡하다는 점이다. 지역적 그리고 계절적 변화는 차치하더라도, 동일한 진흙이 물리적 상황, 즉 외력에 따라 거동을 달리하기 때문이다. 액체도 고체도 아니고, 그렇다고 해서 단순한 점탄성 모형이나 점소성 모형도 잘 들어맞지 않다. 게다가, 자연환경에서 점토퇴적층은 대부분 성층화되어 있어 깊이에 따라 그 물리적 특성이 급격히 달라진다. 하지만, 이러한 상황이 이론학자들에게는 이점으로 작용하기도 한다. 정확한 유변학적 모형이 알려지지 않았으므로, 간단한 모형들 (점성, 탄성, 점탄성, 점소성 등) 중 하나를 자유롭게(?) 선택해서, 파랑에 의해 유도된 퇴적층내의 흐름을 계산하고, 그를 이용하여 다시 파랑의 감쇄 정도를 예측하면 하나의 이론이 완성되는 것이다.

이미 수많은 학자들이 각기 다른 이론들을 정립

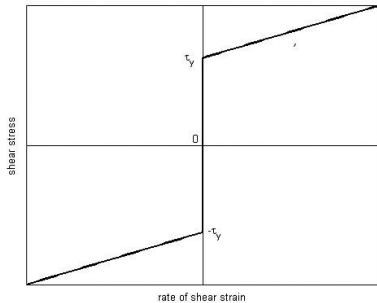


그림 1. Bingham 모형

하였는데(Park & Liu 2010 내 참조문헌 참고), 특히 최근에 Chan & Liu (2009)가 점소성 모형(특히 Bingham 모형, 그림 1 참조)을 이용하여 흥미로운 결과를 발표하였다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 Bingham 모형은 항복응력(yield stress)과 점성도(viscosity)의 두 가지 매개변수로 정의할 수 있다. 즉, 물질 내 응력이 항복응력보다 작으면 강체로 남아 있고, 응력이 항복응력보다 커지면, Newton 유체로서 거동을 한다. 또한, 다시 응력이 줄어들면, 이력현상 없이 다시 강체로 돌아오게 된다. 이러한 Bingham 모형으로 가정된 점토퇴적층과 해수의 경계면에서 수직 방향 변위와 수평방향 전단응력이 무시할 만큼 작다고 가정하면, 퇴적층 내 흐름은 수면파랑에 의해 유도된 압력경사에 의해서만 발생한다. 수학적으로 볼 때 이러한 가정들은 경계층 흐름해석에서의 가정들과 동일하다. Liu, Park & Cowen (2007)은 고립파(solitary wave)하에서의 경계층 밖의 흐름 방향은 항상 고립파의 진행 방향과 동일하지만, 압력경사의 방향이 바뀌면서 경계층 내 흐름은 고립파 진행 방향과 반대로 바뀌는 것을 이론 및 실험적으로 관찰하여 발표한 바 있다. 이에 따라, 경계층 안팎의 전단응력 방향들도 서로 달라지고, 그 중간에 적어도 한 지점에서는 전단응력이 소멸하게 된다. 같은 원리를 Bingham 점토퇴적층에 적용하면, 전단응력이 최대치인 바닥 근처에서는 점착성유사가 Newton 유체로 거동하고, 그 위에 강체상태의 유사가 표류하며, 다시 그 위에는 점성흐름이 존재하

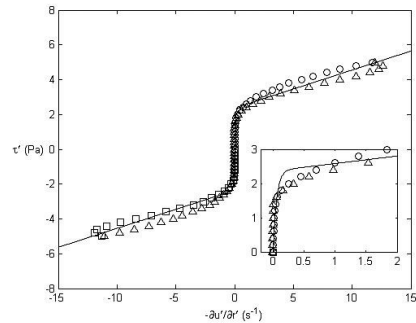


그림 2. Carbopol 수용액의 유변학적 측정치 (Park &amp; Liu 2010).

고, 마침내 퇴적층과 해수의 경계면에서는 다시 유사가 강체상태로 남게 된다. 즉, 고립파 하에서 점토퇴적층은 그 거동특성에 따라 최대 네 개의 구간으로 구분될 수 있다는 것이다. 하지만, 각 구간의 범위, 위치 및 개수는 동적으로 변화하기 때문에 고립파보다 복잡한 파동을 적용할 경우, 해석해를 구할 수 없다.

Park & Liu (2010)는 수치해석을 통하여, 보다 복잡한 외력 하에서도 비슷한 결과를 예측할 수 있다는 것을 보였고, 실험으로 증명하고자 하였다. 실험에는 실제 진흙 대신, Bingham모형에 잘 따르는 것으로 알려진 Carbopol 수용액을 사용하였는데(그림 2), 이 물질은 투명하여 정량적 유동가시화 기법을 사용하기에 적절하다.

외력으로는 압력경사만 작용하기 때문에, 투명한 대형 U자형 관을 만들어 그 안에 Carbopol 수용액을 채우고 한 쪽에 공기압력을 주기적으로 가하여 흐름을 유도하였다. 그러나 실험결과는 수치해석결과와 매우 달랐다(그림 3).

강체로 남아있어야 할 구간에서 오히려 더 큰 변형이 관찰된 것이다. 사실 원인은 간단하다. 내부응력이 항복응력보다 작을 경우, Carbopol 수용액은 강체가 아니라 탄성체로서 작용하는 것이다. 점소성 물질이 고체상태일 때 탄성을 고려한 모형을 점탄소성 모형이라 하는데, 유변학 분야에서는 이미 널리 알려져 있다. 점탄소성 모형 중 가장 간단한 형태를 이용하여 수치해석을 실시한 결과 실험결과

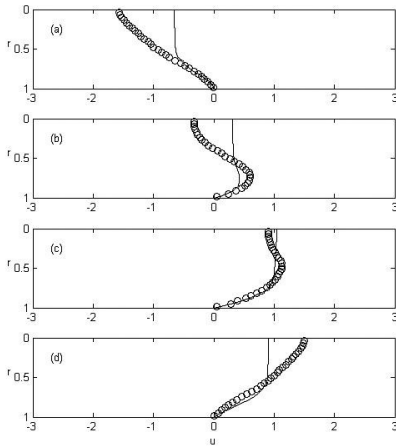


그림 3 Carbopol 수용액을 이용한 실험결과와 Bingham 모형을 이용한 수치해석결과의 비교 (Park & Liu 2010).

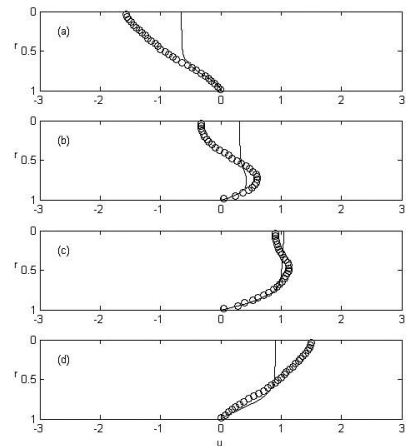


그림 4 Carbopol 수용액을 이용한 실험결과와 점탄 소성 모형을 이용한 수치해석결과의 비교 (Park & Liu 2010).

에 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다(그림 4).

위에 언급한 연구에서 한 가지 주목할 점이 있는데, 동일한 매개변수들(즉, 탄성도, 점성도, 항복응력)을 다른 실험조건에 적용하여도 실험결과와 근사한 수치해석결과를 얻었다는 점이다. 한편, 동일한 실험결과를 점탄성 모형을 이용해서도 모의할 수 있는데, 이 경우에는 실험조건이 달라질 경우, 같은 물질을 사용했음에도 불구하고, 유변학적 매개변수들(탄성도 및 점성도)을 다르게 입력해야만 한다(Park, 2009).

이러한 결과가 의미하는 바는 무엇일까? 앞서 언급했듯이, 점착성유사로 이루어진 퇴적층은 외력에 따라 유변학적 매개변수들이 급격히 변하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 그러한 결과가 정확하지 않은 유변학적 모형을 사용했기 때문에 나타난

것은 아닐까? Park & Liu (2010)의 연구에서와 같이 간단한 점탄소성 모형을 실제 점착성유사 퇴적층에 적용하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있지 않을까? 물론, 속단하기에는 이르다. 무엇보다도 Park & Liu (2010)의 연구는 Carbopol 수용액을 이용한 결과일 뿐, 실제 점착성유사도 동일하게 거동하리라는 보장은 없기 때문에, 점착성유사를 이용한 실험연구가 선행되어야 한다. 또한, 진흙층과 해수의 경계면에서 변위 및 전단응력이 무시할 수 없을 만큼 큰 경우, 난류혼합 또한 고려되어야 할 것이다. 아울러, 이 이론이 더욱 유용해지기 위해서는 퇴적층 내 성층화 현상과 부유사의 거동 또한 함께 고려할 필요가 있다. 앞으로도 풀어야 할 흥미로운 문제들이 많이 남아있는 만큼, 이 분야의 연구가 국내에서도 활성화되기를 기대해 본다. ☞

### 참고문헌

1. Chan, I.-C. & Liu, P. L.-F. 2009 Responses of Bingham-plastic muddy seabed to a surface solitary wave. *J. Fluid Mech.* Vol. 618, pp. 155-180.
2. Gade, H. G. 1958 Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water. *J. Mar. Res.* Vol. 16, pp. 61-82.
3. Liu, P. L.-F., Park, Y. S. & Cowen, E. A. 2007 Boundary layer flow and bed shear stress

- under a solitary wave. *J. Fluid Mech.* Vol. 574, pp. 449–463.
4. McAnally, W. H., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter, E., Shrestha, P., Rodriguez, H., Sheremet, A. & Teeter, A. 2007a Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. Part 1. Present state of understanding on character and behavior. *ASCE Task Committee on Management of Fluid Mud. J. Hydraul. Engng*, Vol. 133, pp. 9–22.
  5. McAnally, W. H., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter, E., Shrestha, P., Rodriguez, H., Sheremet, A. & Teeter, A. 2007b Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. Part 2. Measurement, modeling and management. *ASCE Task Committee on Management of Fluid Mud. J. Hydraul. Engng*, Vol. 133, pp. 23–38.
  6. Park, Y. S. 2009 Seabed dynamics and breaking waves. PhD dissertation. Cornell University.
  7. Park, Y. S. & Liu, P. L.-F. 2010 Oscillatory pipe flows of a yield–stress fluid. *J. Fluid Mech.* Vol. 658, pp. 211–228.