

압밀이 오염물질 이동에 미치는 장기적 영향

Long-Term Effect of Consolidation on Contaminant Transport

이 장 근¹ Lee, Jang-Guen

김 도 윤² Kim, Do-Yoon

박 재 우³ Park, Jae-Woo

Abstract

Dredging and disposal is a conventional method to remove contaminated sediments. However, there are some problems in dredging and disposal, such as disturbance of contaminated sediments, disposal site determination, and high construction cost. Recently, in-situ capping which overcomes the problems of dredging and disposal is widely applied to isolate local contaminated sites. Numerical studies, which have been conducted to simulate contaminant transport during in-situ capping, have been concerned mainly with diffusive transport. However, contaminated sediments experience large strain consolidation induced by self-weight because of initially high moisture content of sediments, and contaminant transport results from advection and diffusion. Previous studies focus on contaminant transport during consolidation, but have neglected consolidation effect on long-term contaminant transport in sediments. This study presents numerical simulation results of consolidation effect on long-term contaminant transport in sediments.

요 지

하저 또는 해저 퇴적오염물질 처리 및 제거는 준설과 매립에 의해 활발히 진행되었다. 그러나 준설과 매립은 준설과정에서 발생하는 퇴적오염물질의 교란, 매립지 선정문제, 고비용 공사비 등으로 인한 많은 제약이 따르고 있다. 이러한 문제로 인해 협소한 지역의 퇴적오염물질에 대해서는 오염물질의 용출 저감을 위한 현장 캡핑이 근래 들어 많이 사용되고 있다. 현장 캡핑에 따른 오염물질 이동에 관해서는 분자확산에 의한 영향이 지배적으로 해석되어 왔으나, 근래 들어 보다 정확한 모사를 하기 위하여 이류-확산을 복합적으로 해석할 필요성이 제기되었다. 퇴적물은 초기 함수율이 높은 슬러지(sludge)상태로 비교적 적은 상재하중과 자중에 의한 압밀이 발생하고, 압밀 과정에서 발생한 간극수 흐름의 변화는 오염물질의 이류에 의한 이동에도 영향이 미친다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 수행된 압밀 과정에서 오염물질의 이동뿐만 아니라 압밀 후 간극비의 감소에 따른 오염물질 이동의 변화에 대하여 분석하고자 한다.

Keywords : In-situ capping, Consolidation, Contaminant Transport, Advection, Diffusion

1. 서 론

세계적으로 환경문제에 관한 관심이 높아짐에 따라 하저 또는 해저 오염퇴적토 처리 및 제거가 큰 이슈가

되었다. 오염퇴적토 처리 기법으로 준설 및 매립에 의한 방법이 일반적으로 많이 이용되고는 있지만, 준설과정에서 발생하는 퇴적층의 교란, 매립지 선정문제, 고비용 공사비 등으로 인한 많은 제약이 따르고 있다. 이

1 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction and Technology, jlee@kict.re.kr, 교신저자)

2 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engr., Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environ. Engr., Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

러한 문제로 인해 협소한 지역의 오염퇴적토에 대해서는 오염물질의 용출 저감을 위한 현장 캡핑(in-situ capping)이 근래 들어 많이 사용되고 있다.

현장 캡핑은 기존 퇴적층 위에 오염되지 않은 새로운 층의 모래, 퇴적토, 또는 자갈과 같은 재료를 포설하여 오염물질이 상부 수층으로 이동하는 것을 제한하는 기술로서, 오염된 퇴적물을 상부수층과 물리적으로 분리하거나 퇴적토를 안정화하여 유해물질이 저서생물 또는 상부 수층으로 이동하는 것을 감소시키는 역할을 한다. 지금까지의 현장 캡핑이 사용될 경우, 분자확산(diffusion)에 의한 오염물질의 거동만 주로 해석되었다. 하지만, 오염된 퇴적층에 캡핑이 적용될 경우, 오염물질의 거동은 매질의 자중과 퇴적물 자체의 높은 초기 함수율로 인해 발생하는 압밀현상과 병행하여 일어난다(Peter and Smith 2002; Alshawabkeh and Rahbar 2006; Fox 2007b; Lee and Fox 2009). 따라서 오염물질의 이동을 해석할 때에 압밀에 의한 영향을 같이 고려하여야만 기존의 이동방정식을 바탕으로 한 분자확산에 의한 해석보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 압밀에 의한 오염물질 이동은 하중 작용시 발생하는 과잉간극수압으로 인한 동수경사로 시간에 따라 간극수의 흐름에 변화가 발생하는 것이 기존의 오염물질 분자확산으로 인한 이동과 가장 큰 차이점이다. 압밀에 의한 오염물질 이동 해석의 필요성은 1990년대 중반부터 수행된 원심재하장치(geotechnical centrifuge)를 이용한 실내 실험의 결과를 바탕으로 압밀이 오염물질의 이동을 가속시킨다는 사실이 밝혀지면서 등장하였다(Potter et al. 1994 and 1997; Moo-Young et al. 2003). 그 후, 개량된 일축압밀시험기를 이용하여 오염물질의 이동과 압밀과의 관계에 관한 상세한 연구가 진행되었고(Alshawabkeh and Rahbar 2004; Lee 2007), 그 결과 오염물질 분자확산에 의한 이동 방향과 압밀 과정에서 발생하는 간극수의 흐름방향이 동일하면 오염물질 이동을 가속시킨다는 사실이 밝혀지면서 초기 함수율이 높은 퇴적토의 압밀 해석을 위한 대변형 압밀 이론(large strain consolidation theory)의 필요성이 제기 되었다.

Fox(2007b)는 압밀 전과 후에 흙의 물리적 특성은 변하고, 이러한 흙의 공극을 통해 이동하는 오염물질의 수축과 흐름에 관해서는 새로운 방법의 해석이 필요하다고 강조하였다. 따라서, 압밀은 오염물질 이동의 전과정에서 영향을 미친다는 결론을 내렸다. 하지만 지금까지는 압밀 과정에서 발생하는 오염물질 이동에 관한 영향

에 대해서만 집중적 연구가 진행 되었고, 압밀 후 장기적 오염물질 이동에 관한 연구는 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 압밀이 오염물질 이동에 미치는 장기적 영향을 수치해석 모델을 이용하여 분석하고자 하였다.

2. 대변형 압밀과 오염물질 이동

미소변형 압밀(small strain consolidation)의 경우 시간에 따른 간극수 흐름으로 인한 포화토의 체적변화를 무시할 수 있지만, 대변형 압밀(large strain consolidation)의 경우 시간에 따른 간극수 흐름은 포화토의 체적변화를 가져오고 이로 인해 간극비와 투수계수가 변한다(Gibson et al. 1981). 퇴적층의 경우에는 높은 초기 함수율로 인해 상대적으로 적은 상재하중에서도 대변형 압밀이 발생한다.

Fox(2007a, 2007b)는 대변형 압밀과 오염물질 이동에 관한 이론을 정립하고 수치해석 모델인 Consolidation Solute Transport 1(CST1) 모델을 개발하였다. CST1 모델은 유한차분법(piecewise-linear method)을 이용하여 대변형 압밀과 오염물질 이동의 2차원 해석이 가능하며, 대변형 압밀 중에 간극비 변화에 따른 투수계수의 변화를 고려하고 단계별 상재하중과 자중에 의한 압밀을 동시에 해석할 수 있다. CST1 모델은 오염물질 이동 해석에서 대변형 압밀 간 발생하는 간극수의 시간에 따른 흐름을 반영하여 이류(advection)와 수리동역학적 분산(hydrodynamic dispersion)을 포함하여 해석한다. 하지만 CST1은 오염물질 이동에서 중요한 수착(sorption)에 대한 해석을 위하여 가장 단순한 linear instantaneous equilibrium sorption 모델을 사용하고 있어, 실질적으로 비선형, 비평형하게 일어나는 오염물질의 수착을 해석하는데 있어 한계점을 지닌다. CST1의 모든 기능을 포함한 CST2모델(Fox and Lee 2008)은 이를 보완하여 non-linear nonequilibrium sorption을 포함한 오염물질 이동 해석이 가능하여 보다 실증적인 연구가 가능하게 되었다. CST2는 오염물질 수착 뿐만 아니라 유효분산계수(effective diffusion coefficient)의 간극비에 따른 변화와 다양한 오염물질 이동 경계조건을 반영하고 있다.

CST2 모델 검증(Fox and Lee 2008; Lee and Fox 2009)에서 압밀이 일어나지 않는 경우의 오염물질 이동은 상용화된 기존의 수치해석 모델들과 이론을 바탕으로 다양하게 비교 검토 되었으며, 대변형 압밀과 병행한 오염물질 이동은 실내실험 결과와 비교 검토 되었다. 이와

같은 일련의 검증 결과를 바탕으로 CST2는 대변형 압밀과 오염물질 이동을 정확히 해석 가능한 모델로 입증되었다.

3. 대변형 압밀의 장기 영향 분석

3.1 압밀과 오염물질 이동 해석

압밀이 오염물질 이동에 미치는 장기적 영향을 분석하기 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 하저 또는 해저에 침전된 오염되지 않은 퇴적층 위에 일정 기간 오염물질이 퇴적된 가상지역에서의 현장 캡핑을 적용하여 살펴 보았다. 오염되지 않은 퇴적층의 두께는 1.5m, 오염 퇴적층은 0.5m, 오염되지 않은 퇴적토를 활용한 현장 캡핑은 1m로 전체 복합층의 두께는 3m로 설정하였다. 복합층의 구분은 오염 유무에 의해 결정되고, 압밀 해석에 필요한 물성치는 전체 복합층에서 동일한 것으로 간주하였다. 또한, 하저 또는 해저로 유입되는 지하수 흐름의 특성을 고려하여 압밀이 발생하지 않을 경우 복합층 하부에서 상부방향으로 지하수가 이동한다고 가정하였다.

CST2를 이용한 수치해석에서 대변형 압밀 해석에는 간극비(e)-유효응력(σ')과 간극비(e)-투수계수(k)의 관계가 필요하며, 이들 관계를 측정하기 위해 압밀시험을 실시하였다. 우선 하중을 재하하고 시간에 따른 침하량과 과잉간극수압을 측정하였다. 측정된 침하량과 과잉간극수압을 바탕으로 압밀 완료 시점을 확인한 후 시료 바닥의 밸브를 열고 주사기펌프(syringe pump)를 이용하여 일정한 유량으로 물을 하부에서 상부로 투과시키며 수압을 측정하였다. 이때 물을 하부에서 상부로 투과시키는 이유는 물의 투과에 따른 침투압으로 발생하는 압밀(seepage consolidation)을 방지하기 때문이다. 투수

시험 중에 침하량 변화를 주의 깊게 살폈으며 침투압으로 인한 침하량의 변화는 없었다. 측정된 수압과 주사기 펌프에서 공급되는 일정한 유량을 이용하여 투수계수를 결정하였다. 투수계수 시험이 끝나면 다음 하중을 재하하고 압밀 종료시점에서 다시 투수계수 시험을 실시하는 반복 작업을 통해 간극비-유효응력과 간극비-투수계수의 관계를 도출하였다. 이들 관계는 Grand Calumet River(Gary, Indiana, U.S)에서 채취한 퇴적토를 사용하여 측정하였으며 다음과 같다(이장근 2008).

$$e = -0.21\log(\sigma') + 1.142 \quad (kPa) \quad (1)$$

$$e = 0.38\log(k) + 4.095 \quad (m/s) \quad (2)$$

압밀은 전체 복합층의 지중에 의해 발생하고 자중 압밀에 필요한 전체 복합층에서의 비중(G_s)은 2.70, 전체 복합층의 초기 간극비(e_o)는 1.4로 균질한 것으로 간주한다(그림 2). 전체 복합층 상부와 하부는 배수가 가능한 양면배수 조건이다. 전체 복합층의 지중에 의해 압밀이 발생할 경우 과잉간극수압으로 인한 전체 복합층 상부와 하부로 흐름이 발생한다. 압밀 종료 시점에는 지하수의 흐름과 동일한 하부에서 상부로의 흐름이 발생한다. 지하수의 흐름을 고려하여(그림 1(a)) 초기 전체 복합층 하부와 상부에서의 수두(h_{wb} 와 h_{wt})는 각각 4.5m와 3.0m로 하부에서 상부로 흐르는 지하수를 고려하였다. 전체 복합층의 두께($H_o=3.0m$)를 고려하면 초기 동수경사(i)는 0.5이다. 압밀이 일어나지 않는다면 초기 간극비를 고려한 식 (2)를 이용하여 계산한 침투유속($v=ki$)은 $4.04 \times 10^{-8}m/s$ 로 일정할 것이다.

오염물질 이동 해석에 필요한 유효분산계수(D^*)는 전체 복합층에서 $5 \times 10^{-10}m^2/s$ 이며 압밀 과정에서도 일정하고, 수차반응은 깨끗한 퇴적층과 오염 퇴적층에서

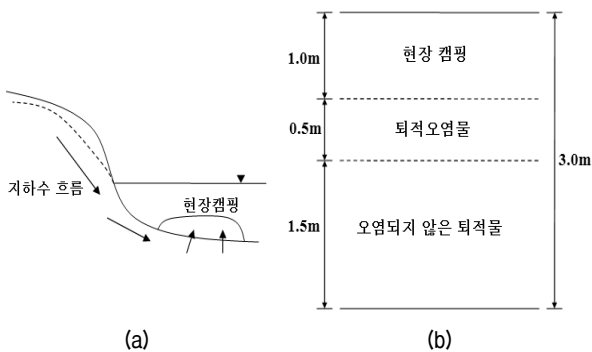


그림 1. 수치해석을 위한 가상의 현장 캡핑: (a) 현장 캡핑 모식도, (b) 현장캡핑 전체 복합층 구조

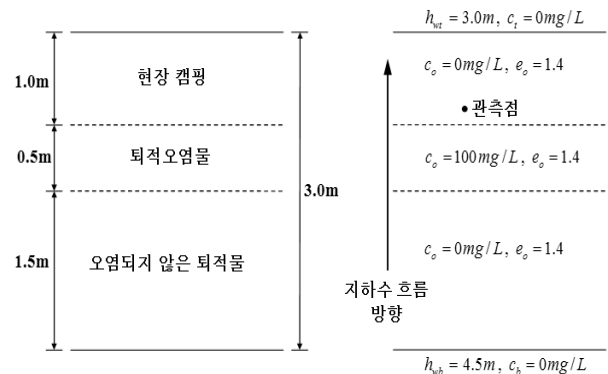


그림 2. 대변형 압밀과 오염물질 이동 해석을 위한 초기 조건과 경계조건

만 발생한다. 수착반응은 linear instantaneous equilibrium sorption으로 선형분배계수(linear distribution coefficient, K_d)는 15mL/g, 초기 오염물질 농도(c_0)는 100mg/L이다. 초기 조건에서 오염된 퇴적토 내의 오염물질은 간극수와 퇴적토 입자에 수착되어 평형상태로 존재한다. 경계 조건은 전체 복합층 하부와 상부에서는 항상 오염되지 않은 물이 공급되는 것으로 간주한다($c_{t,b} = 0\text{mg/L}$).

3.2 대변형 압밀 분석

그림 3(a)는 자중에 의한 압밀 결과를 보여주고 있다. 압밀이 발생하지 않는 경우(CASE I), 전체 복합층의 높이는 일정하다. 압밀이 발생하는 경우(CASE II), 90% 압밀은 136일, 100% 압밀은 약 3년이 소요되고 최종 높이(H_f)는 2.54m로 체적변형율은 약 15.5% 발생하였다. 압밀 과정에는 과잉간극수압으로 인한 동수경사와 간극비의 변화에 따라 침투유속이 지속적으로 변한다. 압밀 후에는 간극비와 전체 복합층 높이 변화에 따른 동수경사의 변화로 침투유속이 초기와는 다른 값을 나타낸다. 정량적 해석을 위해 압밀과 오염물질 이동 해석에서 오염된 퇴적물의 10cm위(캡핑층 내부)에 위치한 관측점(그림 2)에서 침투유속과 오염물질의 농도(c) 변화를 관찰하였다. 그림 3(b)는 침투유속을 보여주고 있다. 압밀이 일어나지 않을 경우(Case I)에는 침투유속이 $v = 4.04 \times 10^{-8}\text{m/s}$ 로 일정하다. 압밀이 일어나는 경우(Case II)

에는 자중에 의한 과잉간극수압의 급격한 상승으로 관측점의 침투유속은 시작 시점으로부터 36.5일(45.6% 압밀)까지는 Case I의 침투유속과 비교하여 빠르고, 36.5일 이후에는 차츰 느려져 100% 압밀 후에는 약 10배 감소한 $v = 4.6 \times 10^{-9}\text{m/s}$ 에 이르렀다.

3.3 오염물질 이동 분석

그림 4(a)는 관측점에서 확인된 오염물질 농도 변화 곡선(breakthrough curve)을 압밀이 일어나지 않는 경우(Case I)와 압밀이 일어나는 경우(Case II)에 대해서 보여주고 있다. 압밀이 오염물질 이동에 미치는 전반적인 영향을 분석하기 위해 logarithmic scale 시간변수로 나타낸다. 압밀이 일어나는 경우(Case II), 오염물질은 36.5일까지 압밀이 일어나지 않는 경우(Case I)에 비해 빠르게 오염물질이 이동하였다. 이는 침투유속의 변화와 밀접한 관계를 갖고 있다. 기존의 연구결과인 오염물질이 확산에 의한 이동 방향과 압밀에 따른 간극수 흐름이 동일한 경우에 압밀은 오염물질 이동을 가속시킨다는 연구 결과를 뒷받침하고 있다(Alshwabkeh and Rahbar 2004; Fox 2007b). 그러나 100% 압밀이 진행 된 후에는 오히려 오염물질 이동이 느려지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 크게 두 가지 원인에 기인한다.

첫째는 압밀 진행 과정에서 침투유속의 감소로 인해 오염물질 이동이 느려졌다. 관측점에서 압밀 후의 침투

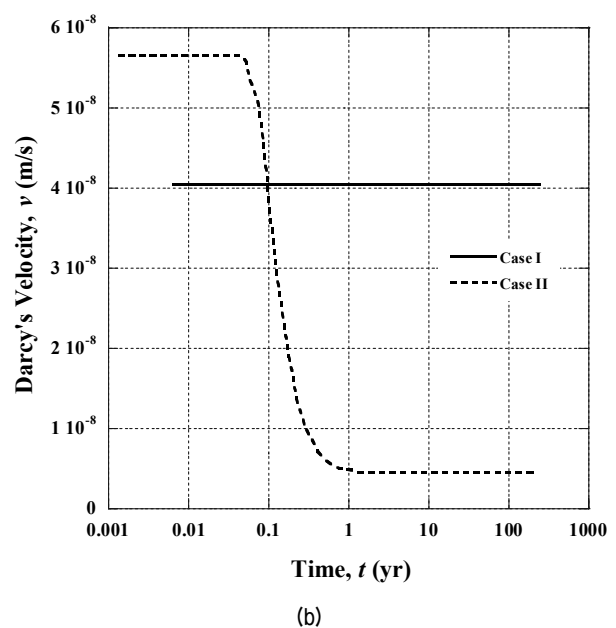
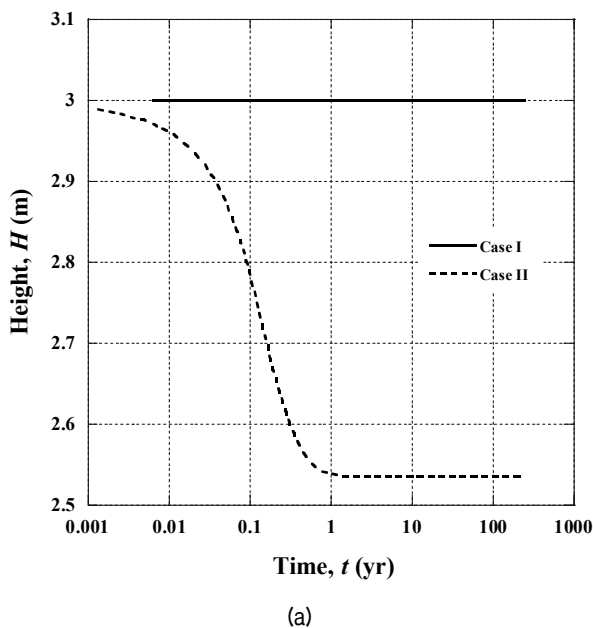
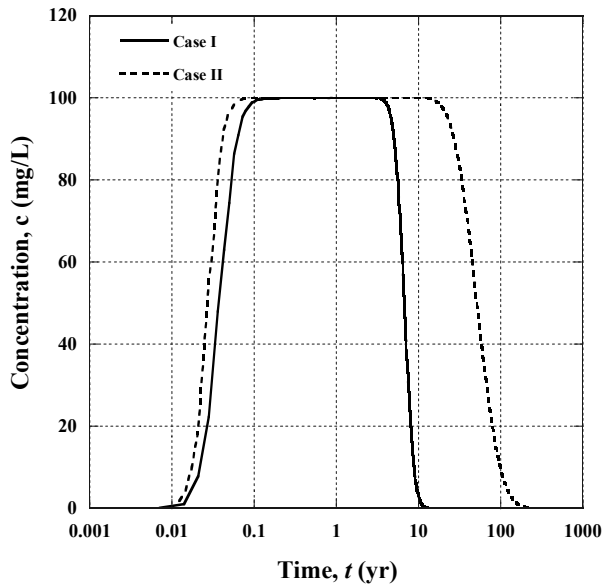
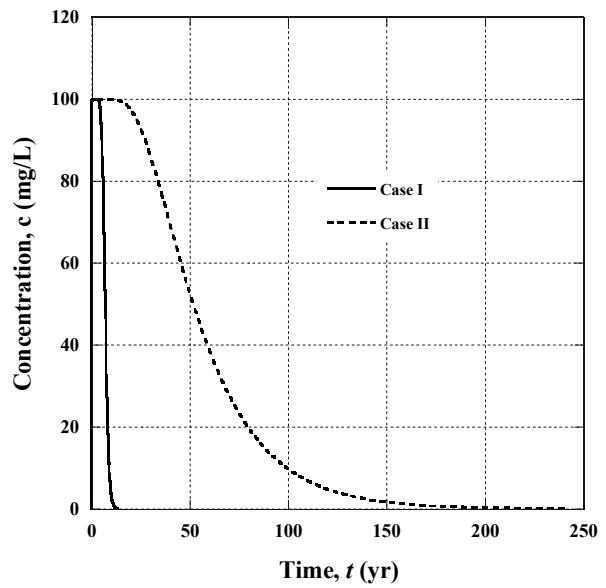


그림 3. 대변형 압밀 결과: (a)압밀곡선, (b)관측점에서 침투유속 변화



(a)



(b)

그림 4. 오염물질 농도 변화 곡선(Case I: 압밀이 일어나지 않는 경우, Case II: 압밀이 일어나는 경우): x축 시간변수의 (a) Logarithmic Scale, (b)Arithmetic Scale

유속은 압밀이 일어나지 않는 경우의 약 10배 감소하며 이는 오염물질 이류(advection)에 의한 이동을 감소시킨다. 둘째는 압밀이 진행됨에 따라 퇴적토의 공극이 감소하여 수착효과를 높인다. linear equilibrium sorption을 사용할 경우 오염물질의 이동 속도를 정량적으로 표현하는 방법으로 지연계수(retardation factor, R)를 사용하며, 지연계수가 증가함에 따라 오염물질 이동 속도는 감소한다. 지연계수를 수식으로 표현하면,

$$R = 1 + \rho_d K_d / n \quad (3)$$

여기서, $\rho_d (= G_s \rho_w)$ 는 흙의 건조 단위 밀도, ρ_w 는 물의 밀도를 나타낸다. 압밀이 진행됨에 따라 공극은 감소하고 퇴적토의 건조 단위 밀도는 증가하므로 지연계수도 증가한다. 따라서 오염물질의 이동 속도는 감소한다.

x축 변수로 log스케일의 시간을 사용한 그림 4(a)에서는 오염물질 농도 변화가 좌우 대칭으로 일정한 유속에 따른 변화로 오인할 수도 있다. 그림 4(b)는 arithmetic scale 시간변수를 이용한 오염물질 농도 변화 곡선이다. 압밀 과정에서 발생하는 농도 변화는 전체 시간에 비해 상대적으로 단기간에 발생하여 그 변화를 볼 수 없다. 압밀이 발생하는 Case II의 장기적 오염물질 이동에서는 그림 4(a)와는 확연히 다르게 오염물질의 농도 변화가 서서히 줄어드는 tailing 효과를 보여주고 있다. 기존의 연구에서 이러한 tailing 효과는 nonequilibrium sorption

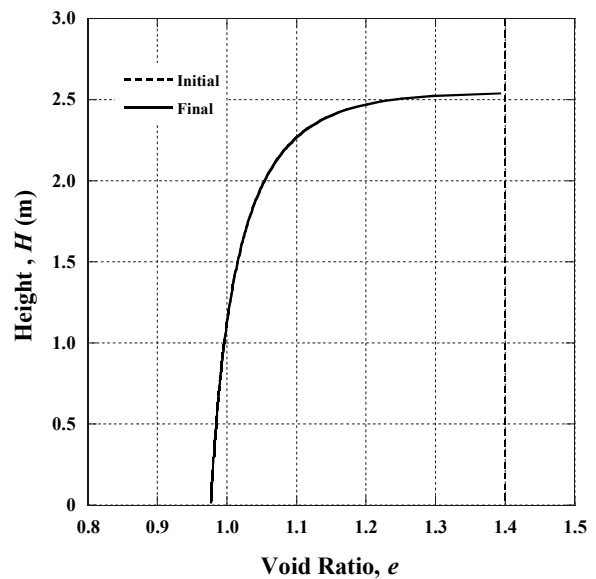


그림 5. 간극비 변화 곡선

이나 흙의 불균질성에 따른 것으로 해석되었다(Van Genuchten and Wagenet 1989; Chen and Wagenet 1997; Altfelder et al. 2001). 본 연구에서는 equilibrium sorption을 사용하였으므로 tailing 효과는 nonequilibrium sorption으로 설명할 수는 없다. 따라서 퇴적토의 불균질성의 관점에서 살펴보면, 압밀 전에는 간극비의 측면에서 퇴적토가 균질(간극비가 전체 복합층에서 동일, $e = 1.4$)하였으나, 압밀 후에는 간극비의 불균질(그림 5)로 인해 이

와 같은 tailing 효과가 발생한 것으로 판단된다.

4. 결론

지금까지 진행되어 온 압밀이 오염물질 이동에 미치는 영향은 초기 압밀 진행과정에서 오염물질 이동과의 관계를 중점적으로 연구하였다. 본 연구에서도 압밀 과정에서 간극수 흐름이 오염물질 확산에 의한 이동 방향과 동일한 경우 오염물질의 이동이 가속 되는 경향을 볼 수 있었다. 이밖에도 수치해석을 이용한 사례연구를 통한 결과는 다음과 같다.

- (1) 압밀이 오염물질 이동에 미치는 영향은 압밀 초기와 진행 과정에서 뿐만 아니라 압밀 종료 후 장기적인 측면에서도 반드시 고려되어야 한다. 압밀은 공극 감소에 따른 투수계수의 감소와 침투유속의 급격한 감소를 초래한다. 침투유속은 이류에 의한 오염물질 이동에 직접적으로 영향을 미치므로 침투유속 감소는 장기적으로 오염물질을 배출하는 원인이 된다.
- (2) 압밀로 인한 퇴적토의 밀도 증가에 따른 오염물질과의 수축 증가와 더불어 압밀과정에서 간극비의 불균질로 인해 오염물질 이동에서 tailing 효과가 발생하여 오염물질의 장기 배출이 예상된다.
- (3) 현장 캡핑 과정에서 발생하는 오염물질의 이동은 압밀을 고려한 해석이 필요하다. 현장 캡핑 과정에서 발생하는 압밀은 단기적으로 오염물질 이동을 가속시키고 장기적인 측면에서 오염물질 이동을 감소시켜 오염물질 처리 전과정에 걸쳐 영향을 미친다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원과 한양대학교 환경시스템연구소 공동으로 현장 캡핑에 관한 요소기술개발 연구 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이장근 (2008), "Numerical study of contaminant transport coupled with large strain consolidation," *한국농공학회논문집*, 제50권, 제2호, pp.45-52.
2. Alshawabkeh, A.N., Rahbar, N., Sheahan, T.C., and Tang, G. (2004), "Volume change effects on solute transport in clay under consolidation," *Advances in Geotechnical Engineering with Emphasis on Dams, Highway Material, and Soil Improvement*, Geotechnical

- Practice Publication No.1, K. Alshibli, A. I. H. Malkawi, M. Alsaleh, eds., ASCE, pp.105-115.
3. Alshawabkeh, A.N., and Rahbar, N. (2006), "Parametric study of one-dimensional solute transport in deformable porous media." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No.8, pp.1001-1010.
4. Altfelder, S., Streck, T., Maraqa, M.A., and Voice, T.C. (2001), "Nonequilibrium sorption of dimethylphthalate-compatibility of batch and column techniques," *Soil Science Society of America Journal*, Vol.65, pp.102-111.
5. Chen, W. and Wagenet R.J. (1997), "Description of atrazine transport in soil with heterogeneous nonequilibrium sorption," *Soil Science Society of America Journal*, Vol.61, pp.360-371.
6. Fox, P.J. (2007a), "Coupled large strain consolidation and solute transport I: Model development." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.1, pp.3-15.
7. Fox, P.J. (2007b), "Coupled large strain consolidation and solute transport II: Model verification and simulation results." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.1, pp.16-29.
8. Fox, P.J., and Lee, J. (2008), "Model for consolidation-induced solute transport with nonlinear and nonequilibrium sorption," *International Journal of Geomechanics*, Vol.8, No.3, pp.188-198.
9. Gibson, R.E., Schiffman, R.L., and Cargill, K.W. (1981), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, II. Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers," *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, Vol.18, pp. 280-293.
10. Lee, J. (2007), *Experimental and Numerical Investigation of Consolidation-Induced Solute Transport*, Ph.D. Thesis, Ohio State University, pp.123-186.
11. Lee, J., and Fox, P.J. (2009), "Investigation of consolidation-induced solute transport. II: Experimental and numerical results," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No. 9, pp.1239-1253.
12. Moo-Young, H., Myers, T., Tarby, B., Ledbetter, R., Vanadit-Ellis, W., and Kim, T.-H. (2003), "Centrifuge simulation of the consolidation characteristics of capped marine sediments beds," *Engineering Geology*, Vol.70, pp.249-258.
13. Peters, G.P. and Smith, D.W. (2002), "Solute transport through a deforming porous medium," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.26, No.7, pp. 683-717.
14. Potter, L.J., Savvidou, C., and Gibson, R.E. (1994). "Consolidation and pollutant transport associated with slurried mineral waste disposal," *Proceedings, 1st International Congress on Environmental Geotechnics*, W. D. Carrier III ed., Canada, pp.525-530.
15. Potter, L.J., Loroy, J J.C., Soga, K., Savvidou, C. and Gibson, R.E. (1997), "Mineral waste disposal - Numerical and centrifuge modeling," *Proceedings, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Germany, pp.1847-1852.
16. van Genuchten, M.Th. and Wagenet, R.J. (1989), "Two-site/ two-region models for pesticide transport and degradation: theoretical development and analytical solutions," *Soil Science Society of America Journal*, Vol.53, pp.1303-1310.

(접수일자 2010. 6. 28, 심사완료일 2010. 11. 4)