

# 초연약 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀해석기법 Part II: 해석기법과 Craney Island 사례분석

## Analysis Method for Non-Linear Finite Strain Consolidation for Soft Dredged Soil Deposit Part II: Analysis Method and Craney Island Case Study

최 항 석<sup>1</sup> Choi, Hangseok      광 태 훈<sup>2</sup> Kwak, Taehoon  
이 철 호<sup>3</sup> Lee, Chulho      이 동 섭<sup>4</sup> Lee, Dongseop  
티모시 스타크<sup>5</sup> Stark, T. D.

### Abstract

This paper presents two analysis methods for characterizing the non-linear finite strain consolidation behavior of highly deformable dredged soil deposits along with the fundamental parameters obtained in the companion paper; that is, the zero effective stress void ratio, the non-linear relationships of void ratio-effective stress and void ratio-hydraulic conductivity. The simplified Morris's analytical solution (2002) and the widely recognized numerical program, PSDDF (Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill) for both single and double drainage conditions are adopted in this paper to verify a series of laboratory experiments for self-weight consolidation of the Incheon clay and Kaolinite. The comparisons show that the analysis methods proposed herein can properly simulate the long-term non-linear finite strain consolidation behavior for dredged soils in the field. In addition, a case study for the artificial Craney Island has been conducted to illustrate the importance of obtaining appropriate non-linear finite strain consolidation parameters and the applicability of PSDDF in promoting dredged soil disposal.

### 요 지

본 논문에서는 압축성이 매우 큰 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동을 평가하기 위해 두 가지 압밀해석 방법이 제시되었다. 이를 위해 동반논문에서 얻어진 초기간극비, 비선형의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계를 비선형 압밀 물성치로 적용하였다. 단순화된 Morris의 간편 이론해(2002)와 대표적인 일차원 비선형 유한변형 압밀 프로그램인 PSDDF(Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill)의 해석결과를 일련의 실내실험을 통해 얻어진 인천 준설토와 카올리나이트의 자중압밀 침하거동과 비교하여, 실제 준설 매립지반의 장기간 비선형 유한변형 압밀거동을 모사하는데 두 방법의 적용이 타당함을 보였다. 또한, Craney Island 인공섬 사례분석을 통하여 적절한 비선형 유한변형 압밀 파라미터 선정의 중요성과 준설 매립지반의 압밀거동 평가시 PSDDF의 적용성을 제시하였다.

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Associate prof., School of Civil, Environ & Architect. Engrg, Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

2 (주) 동명기술공단 (DMEC Co., Ltd.)

3 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Graduate student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg, Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg, Korea Univ.)

5 미 일리노이대 토목환경공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Illinois, USA)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

준설매립지반은 함수비가 높으며 압밀 침하량이 크게 발생하는 현상으로 인해 미소변형을 가정하여 압밀해석에 널리 사용되는 Terzaghi의 이론에 의한 해석은 실제 준설매립지반의 거동과 크게 차이가 나는 경우가 종종 보고되고 있다. 따라서 준설매립지반의 거동 예측은 일반적으로 응력-변형률 관계의 비선형성과 압밀이 진행되는 동안 투수계수의 감소를 고려한 비선형 유한변형 압밀 이론을 기반으로 수행하는 것이 합리적이라 할 수 있다(Gibson 등, 1967). Gibson 등(1967)은 Terzaghi이론을 보완한 비선형 유한변형 압밀이론을 제시하였다. 복잡한 편미분 방정식형태인 Gibson 등(1967)의 비선형 유한변형 압밀식은 모든 조건에 대해 이론해를 직접 구하기 어렵기 때문에 Cargill(1982, 1983)은 수치해석을 위한 유한차분식을 제시하였으며, Stark 등(2005a, 2005b)은 준설매립지반 수치해석 프로그램인 PSSDDF(Primary Consolidation Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill)을 개발하였다. 한편, Morris(2002)는 Gibson 등(1967)에 의해 제안한 비선형 유한변형 압밀식에 대하여 부분적으로 선형화시킨 간편 이론식을 제안하였고, 이로부터 일면배수와 양면배수 경계조건에 대한 이론해를 제시하였다.

본 논문에서는 동반논문인 곽태훈 등(2011)이 제안한 일련의 실내시험을 통해 얻어진 인천 준설토와 카울리나이트 시료의 초기간극비, 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계 등의 비선형 압밀 물성치를 적용하여 Morris의 이론해와 PSSDDF 프로그램을 통해 준설매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동 평가를 위한 실무적인 해석 및 해석절차를 제안하였다. 전술한 해석결과를 인천 준설토와 카울리나이트 시료에 대해 수행된 일련의 실내 자중압밀 시험결과와의 비교를 통해 본 논문에서 제안된 비선형 유한변형 압밀 해석 수행 기법의 타당성을 검증하였다.

또한, 비선형 유한변형 압밀해석 프로그램인 PSSDDF의 적용성을 제시하기 위해 Craney Island 인공섬 사례 분석을 수행하였다. 이 사례분석에서는 미국 버지니아주에 소재한 Craney Island 준설매립장의 장기 침하거동을 PSSDDF를 사용하여 예측하고 최근까지의 현장 실

측자료와 비교하였다. Craney Island 준설매립장은 미국 버지니아주 노포크 근처에 위치하고 1956년부터 인근 수로와 항구로부터 준설된 토사가 매립 저장되고 있다(최하석과 Stark, 2005; Cargill, 1986; Stark 등, 1994). PSSDDF로 예측한 각 시기별 계면고 높이는 현장 실측된 자료와 잘 일치함을 보였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 일차원 비선형 유한변형 압밀 이론

준설매립으로 조성된 초연약 점토지반은 압밀 침하량이 크고 압밀이 진행되는 동안 지반의 투수계수가 변하며, 간극비와 유효응력의 관계가 비선형을 나타낸다. 따라서 실제 초연약지반의 압밀거동을 예측하기 위해서는 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계의 비선형성을 고려한 유한변형 압밀이론의 적용이 필요하다. 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 관계를 선형으로 가정한 Terzaghi 압밀이론의 한계를 극복하기 위하여 Gibson 등(1967)은 비선형 유한변형 압밀이론을 제시하였다. 침하량이 큰 초연약지반의 특성상, 시간의 변화에 따라 경계좌표가 변하는 유동좌표계(convective coordinate)를 적용해야 하지만, 해석의 편의를 위해 시간에 따라 변하지 않는 물질좌표계 또는 축소좌표계(material or reduced coordinate)를 도입하였다(그림 1 참조). 물질좌표계는 오직 흙 입자만의 부피를 표현하므로 시간, 변위에 관계없이 일정하다.

비선형 유한변형 압밀식을 유도하는 과정에서 무한소 체적으로 유입 및 유출되는 유체의 연속성 관계는 시간에 따라 변화하는 유동좌표계를 적용해야 한다. 이렇게 유도된 자중압밀을 고려한 비선형 유한변형 압밀에 대한 편미분 방정식은 시간에 따른 좌표축의 변화로

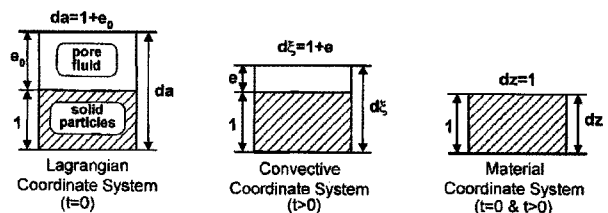


그림 1. 좌표체계 및 각 좌표체계의 관계

말미암아 해석을 매우 복잡하게 만든다. 이에 반에, 그림 1에 제시된 각 좌표계의 관계를 이용하여 유동좌표계로 유도된 편미분 방정식을 물질좌표계로 변환하여 나타내는 것이 편리하다. 따라서 물질좌표계로 유도된 비선형 유한변형 압밀에 대한 편미분 방정식으로부터 구한 해를 그림 1의 관계를 이용하여 역으로 물질좌표계에서 유동좌표계로 변환시키면, 실제 비선형 유한변형 압밀 거동을 표현할 수 있다. 이러한 고정좌표계에 대한 간극수와 흙 입자로 구성된 흙 토체에서의 평형방정식, 흙 입자와 간극수의 시간변화에 따른 연속방정식, 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계로부터 다음과 같은 비선형 유한변형 압밀이론식을 유도할 수 있다 (Gibson 등, 1967).

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w}-1\right)\frac{d}{de}\left[\frac{k(e)}{(1+e)}\right]\frac{\partial e}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)}\frac{d\sigma'}{de}\frac{\partial e}{\partial z}\right]+\frac{\partial e}{\partial t}=0 \quad (1)$$

여기서,  $z$ 는 물질좌표계,  $e$ 는 간극비,  $k(e)$ 는 간극비의 함수로 표현되는 투수계수,  $\gamma_s$ 는 흙 입자의 단위중량,  $\gamma_w$ 는 간극수의 단위중량,  $\sigma'$ 은 유효응력,  $t$ 는 시간을 의미한다.

또한, Gibson 등(1967)은 비선형 유한변형 압밀이론식을 유도하는 과정에서 흙 입자와 간극수의 상대적인 변위를 고려하여 상대속도 개념을 적용한 수정 Darcy의 법칙을 이용하였다. 또한, 비선형 유한변형 압밀이론식에 다음과 같은 비선형계수  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 도입하였다.

$$g(e)=-\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)}\frac{\partial \sigma'}{\partial e} \quad (2)$$

$$\lambda(e)=-\frac{d}{de}\left(\frac{de}{d\sigma'}\right) \quad (3)$$

식 (1)의 비선형 유한변형 압밀에 대한 편미분 방정식은 자중압밀을 고려할 수 있고, 시간에 따라 변하는 간극비의 함수로 투수계수가 표현되며, 응력단계에 따른 간극비-유효응력 관계를 적용할 수 있기 때문에 압축성이 큰 준설패립지반과 같은 초연약지반의 자중압밀 및 재하하중에 대한 압밀거동을 예측하는데 적합하다.

일반적으로 식 (1)은 모든 조건에 대해 이론해를 직접 구하기 어렵기 때문에 Cargill(1982, 1983)은 식 (1)을 수치해석에 적용할 수 있는 유한차분식으로 표현하였다. Cargill(1982, 1983)은 간극비와 투수계수의 함수인  $\beta(e)$ , 간극비와 투수계수, 압축계수의 함수인  $\alpha(e)$ 와 물

질좌표계를 도입하여 각 각 식 (4)와 (5)로 나타내어 유한차분식을 다음의 식 (6)과 같이 제시하였다.

$$\beta(e)=\frac{d}{de}\left(\frac{k(e)}{1+e}\right) \quad (4)$$

$$\alpha(e)=\frac{k(e)}{1+e}\frac{d\sigma'}{de} \quad (5)$$

$$e_{i,i+j}=e_{i,j}-\frac{\tau}{\gamma_w}\left\{\gamma_w\beta(e_{i,j})+\left[\frac{\alpha(e_{i+1,j})-\alpha(e_{i-1,j})}{2\Delta z}\right]\right\}\times\left[\frac{e_{i+1,j}-e_{i-1,j}}{2\Delta z}\right]+\alpha(e_{i,j})\left[\frac{e_{i+1,j}-2e_{i,j}+e_{i-1,j}}{\Delta z^2}\right] \quad (6)$$

비선형 유한변형 압밀해석 프로그램인 PSDDF(Stark 등, 2005a)는 Cargill(1982)의 유한차분식을 적용하여 준설패립지반과 같은 초연약지반의 비선형 유한변형 압밀 해석을 수행할 수 있는 수치해석 프로그램이다. PSDDF는 준설패립지반의 일차압밀, 이차압밀, 건조수축에 의한 압밀거동을 고려할 수 있고, 이를 위한 일차압밀, 이차압밀, 건조수축에 대한 입력 데이터는 일련의 실내시험을 통해 얻을 수 있다. 이 중 일차압밀과 관련이 있는 준설패립토의 초기간극비, 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계의 정확한 산정이 요구된다. 이차압밀은 일차압밀이 완료되는 시점부터 발생하는 압축 크리프 현상으로 PSDDF에서는 Mesri와 Godlewski(1977)가 제안한 이차압밀의 시간에 따른 압축지수( $C_\alpha$ )와 일차압밀의 압축지수( $C_c$ )의 비가 임의의 압밀응력 하에서 일정하다는  $C_\alpha/C_c$  개념이 도입되었다. 건조수축에 대해서는 본 논문과 관련성이 적으므로 언급하지 않으며, 건조수축에 대한 자세한 내용은 Stark 등(2005a)을 참조하길 바란다.

## 2.2 Morris의 간편 이론해

Gibson 등(1967)이 제시한 식 (1)은 모든 조건을 고려한 엄밀한 이론적인 해를 구할 수 없기 때문에 Morris(2002)는 비선형 압밀계수  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 상수로 가정하여 비선형인 초연약지반의 투수성과 압축성을 부분적으로 선형화하여 식 (7)과 같이 간편화하였다.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2}+\lambda(\gamma_s-\gamma_w)\frac{\partial e}{\partial z}=\frac{1}{g}\frac{\partial e}{\partial t} \quad (7)$$

여기서,  $\lambda$ 는 압축성과 관련된 선형화된 상수,  $g$ 는 상

수로 표시된 유한변형 압밀계수를 의미한다.

이로부터 Morris(2002)는 상하방향 양면 배수조건(식 (8)) 및 상방향 일면 배수조건(식 (9))에 대한 압밀 이론해를 제시하였다.

$$U(T) = 1 - 2\pi^2 N \left( \frac{\left[ \exp\left(\frac{N}{2}\right) - \exp\left(-\frac{N}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{N^2 T}{4}\right)}{N + \exp(-N) - 1} \right) \times \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \left( \frac{n^2 \left[ \exp\left(-\frac{N}{2}\right) + (-1)^{n+1} \right] \exp(-n^2 \pi^2 T)}{\left[ \left(\frac{N}{2}\right)^2 + (n\pi)^2 \right]^2} \right) \quad (8)$$

$$U(T) = 1 - 2N^2 \left( \frac{\exp\left(\frac{N}{2} - \frac{N^2 T}{4}\right)}{N + \exp(-N) - 1} \right) \times \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \left( \frac{\alpha_n \sin(\alpha_n) \exp(-\alpha_n^2 T)}{\left[ \alpha_n^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2 + \frac{N}{2} \right] \left[ \alpha_n^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2 \right]} \right) \quad (9)$$

여기서,  $N = \lambda l(\gamma_s - \gamma_w)$ ,  $T = \frac{gt}{\gamma^2}$ ,  $l$ 은 흙 입자만의 두께, 푸리에 상수  $\alpha_n$ 은 다음의 식 (10)과 같이 표현될 수 있다(Hildebrand, 1949):

$$\alpha_n = \frac{2n\pi(-1)^{n+1} \left[ \exp\left(\frac{N}{2}\right) - \exp\left(-\frac{N}{2}\right) \right]}{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + (n\pi)^2} \quad (10)$$

Morris의 간편 이론해는 편미분 방정식인 비선형 유한변형 압밀이론식에서 비선형인 초연약지반의 투수성과 압축성을 부분적으로 선형화하여 별도의 수치해석의 도움 없이 해를 구할 수 있도록 한다. 하지만, 준설패립지반의 투수성과 압축성의 비선형성이 매우 클 경우, Morris의 간편 이론해는 정밀한 해를 주지 못할 수 있다. 또한, Morris의 간편 이론해는 준설패립 현장에서 투기 후 일정기간 방치한 후에 재투기 하는 조건(즉, 단계매립 조건)을 모사할 수 없는 단점이 있다.

### 3. 실내 시험 결과와 제안된 해석방법의 비교를 통한 적용성의 검증

#### 3.1 실내 실험방법 및 결과

Morris의 간편 이론해와 PSDDF 프로그램을 이용하여 준설패립지반의 비선형 유한변형 압밀거동 특성을 평가하기 위해서 인천 준설토와 카울리나이트 시료에

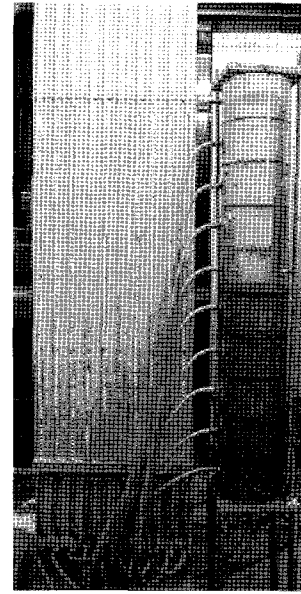


그림 2. 실내 자중압밀 실험장치(시료높이 100cm)

표 1. 실내 자중압밀 실험조건

구분	초기 시료높이	배수 조건
인천 준설토	30cm	양면 및 일면
카울리나이트	30cm	양면 및 일면
	100cm	양면 및 일면

대해 일련의 실내 자중압밀실험을 수행하였다. 자중압밀 실험장비는 지름 15cm, 높이 10cm의 투명 아크릴로 제작하였고, 깊이별 간극수압 측정을 위해 각 아크릴 셀마다 간극수압 측정용 벨브를 설치하였다. 각 아크릴 셀을 직렬로 연결함으로써 임의 높이의 자중압밀 실험장치를 구성할 수 있다. 초기 시료높이 30cm와 100cm 두 가지 경우에 대해 실험이 수행되었다. 100cm 자중압밀 장치는 그림 2에서 볼 수 있다. 즉, 표 1과 같이 인천 준설토는 30cm 높이의 일면 및 양면배수 조건으로, 카울리나이트는 30cm높이 및 100cm 높이에 대하여 일면 및 양면배수 조건으로 각각 실시하였다. 인천 준설토와 카울리나이트 시료는 동반논문(곽태훈 등, 2011)에서 구한 초기간극비(인천 준설토  $e_{00}=7.29$ , 카울리나이트  $e_{00}=7.38$ )에 해당하는 함수비를 각각 적용하여 시료를 조성한 후 자중압밀실험을 수행하였다.

Morris의 간편 이론해와 PSDDF 프로그램 결과와 비교하기 위해 각 자중압밀 실험조건에 대해 시간에 따른 계면고의 변화를 지속적으로 측정하여 그림 3, 4, 5에 정리하였다.

일면 및 양면배수 조건으로 수행한 30cm, 100cm 높이의 자중압밀 실험결과에서 시간에 따른 계면고의 변

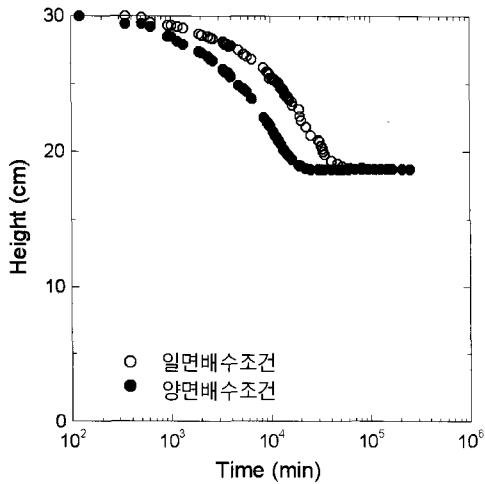


그림 3. 시간에 따른 계면고 변화(인천 준설토, 시료높이 30cm)

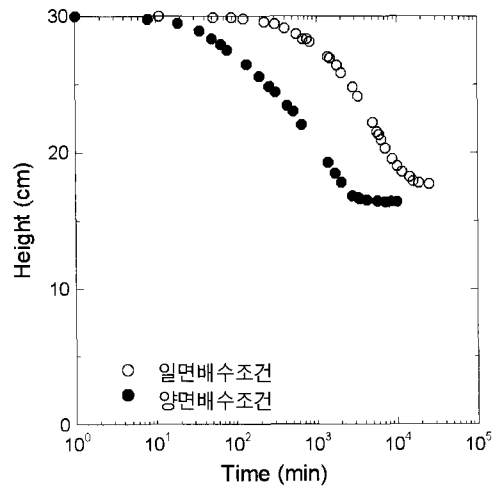


그림 4. 시간에 따른 계면고 변화(카올리나이트, 시료높이 30cm)

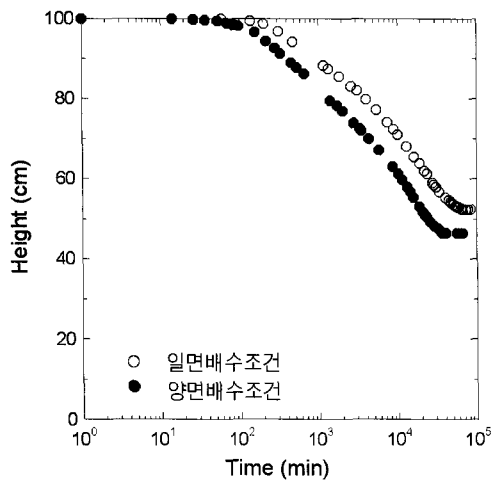


그림 5. 시간에 따른 계면고 변화(카올리나이트, 시료높이 100cm)

화는 배수거리 차이로 인해 상하부 양면배수 조건이 상부 일면배수 조건보다 자중압밀 속도가 현저히 빠름을 알 수 있다. 또 하나의 흥미로운 결과는 양면배수 조건과 일면배수 조건의 압밀속도 뿐 아니라 최종 침하량도 양면배수 조건이 일면배수 조건보다 다소 크게 측정됨을 볼 수 있다. 특히, 이러한 경향은 카올리나이트가 인천 준설토 보다 그리고 초기 시료높이가 100cm인 경우가 30cm인 경우 보다 현저한데, 이는 양면배수시, 하방향으로 침투가 발생하여 하방향 침투수력(seepage force)에 의한 추가된 유효응력 때문으로 볼 수 있다.

### 3.2. Morris 간편 이론해와 자중압밀 실험결과 비교

전술한 바와 같이 비선형 압밀계수  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 상수로 가정하여 비선형인 초연약지반의 투수성과 압축성을 선형화한 Morris(2002) 간편 이론해에서는 경계조

건을 적용하여 양면 및 일면배수 조건에 대한 이론해는 각각 식 (8)과 (9)와 같다. 본 논문에서는 Morris(2002)가 제안한 간편 압밀이론해의 적용성을 평가하고자 일련의 실내 자중압밀실험 결과와 비교하였다. Morris(2002)의 간편 이론해를 구하기 위해서 동반논문(곽태훈 등, 2011)에서 구한 인천 준설토와 카올리나이트 시료의 비선형 유효변형 압밀 물성치를 적용하였다.

본 논문에서는 지면의 제한으로 카올리나이트 100cm 시료의 양면배수 조건에 대한 Morris(2002) 간편 이론식 적용 과정만을 설명한다. 다른 조건에 대해서도 동일한 과정으로 해석을 수행할 수 있다. 카올리나이트 시료 100cm 높이의 자중압밀 실험결과에서 산정된 흙 입자만의 두께( $l$ )은 11.88cm이다.  $\lambda$ 값은 동반논문(곽태훈 등 2011)에서 구한 카올리나이트의 간극비-유효응력 관계로부터 구할 수 있고, 이 값은 시료의 깊이에 상관없이 항상 같은 값을 갖는다. 따라서  $N = \lambda l (\gamma_s - \gamma_w)$  식에 의해 산정된 주어진 자중압밀 실험조건에 대한  $N$ 은 2.74로 계산된다. 산정된  $N$ 을 이용하여 Morris(2002)의 양면배수 조건에서의 간편 압밀식(식 (8))에 대입하여, 그림 6과 같은 시간계수( $T$ )에 따른 압밀도 관계를 찾는다. 이 압밀도 관계에서 압밀도가 50%일 때의 시간계수( $T_{50}$ )를 산정하면  $T_{50}$ 는 0.056이다. 실내 자중압밀 실험으로부터 측정된 카올리나이트 시료의 시간에 따른 계면고 변화로부터 압밀량 기준으로 압밀침하량의 50%일 때의 압밀시간( $t_{50}$ )을 구하면  $t_{50}$ 는 약 3200분이다. 따라

서,  $T_{50} = \frac{g t_{50}}{l^2}$  관계를 이용하여 압밀도가 50%일 때 유효변형 압밀계수( $g$ )를 산정할 수 있다. 카올리나이트 시

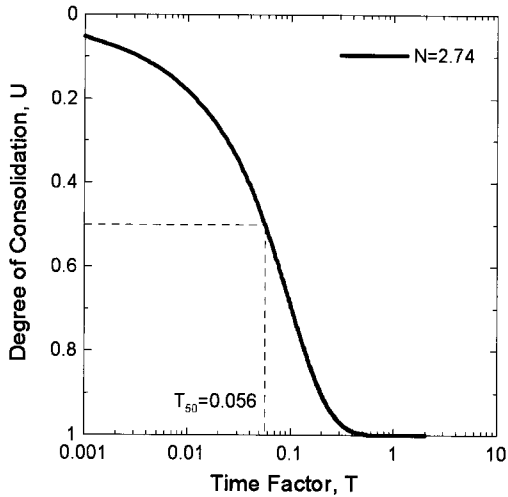


그림 6. 카올리나이트 100cm 시료 양면배수 조건의 시간계수에 따른 압밀도(N=2.74)

료 100cm 높이의 양면배수 자중압밀 실험결과로부터 산정된 유한변형 압밀계수( $g$ )는  $0.00247\text{cm}^2/\text{min}$ 이다. 산정된 유한변형 압밀계수( $g$ )를 Morris(2002)의 간편 이론해에 적용하여 시간에 따른 계면고 높이를 구하고 실내 자중압밀 실험결과와 비교하였다. 카올리나이트 시료 100cm 높이 이외의 경우도 동일한 과정으로 Morris(2002)의 간편 이론해를 구할 수 있고, 이 결과들을 실내 자중압밀 실험 결과와 더불어 그림 7부터 11까지 비교하였다.

그림 7과 8에서 비교한 인천 준설토 30cm 높이(양면과 일면배수), 그리고 그림 9에서 비교한 카올리나이트 시료 30cm 높이의 양면배수 조건의 경우에는 실내 자중압밀 실험결과와 Morris(2002)의 간편 압밀해가 잘 일치하는 경향을 볼 수 있다. 하지만, 그림 10과 11에의 카올리나이트

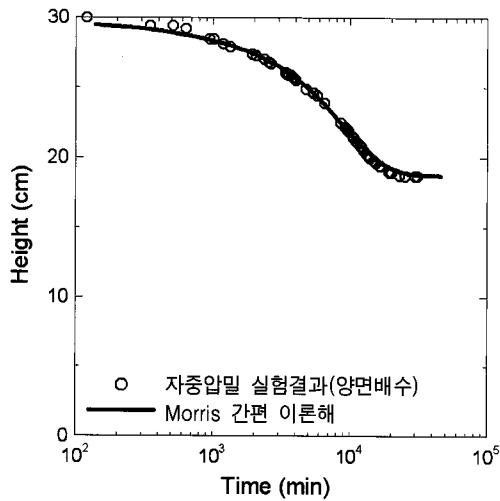


그림 7. 자중압밀 실험결과와 Morris 간편 이론해 비교(인천 준설토, 시료높이 30cm, 양면배수)

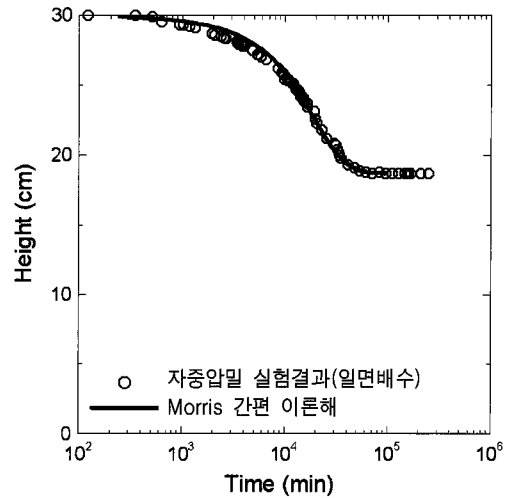


그림 8. 자중압밀 실험결과와 Morris 간편 이론해 비교(인천 준설토, 시료높이 30cm, 일면배수)

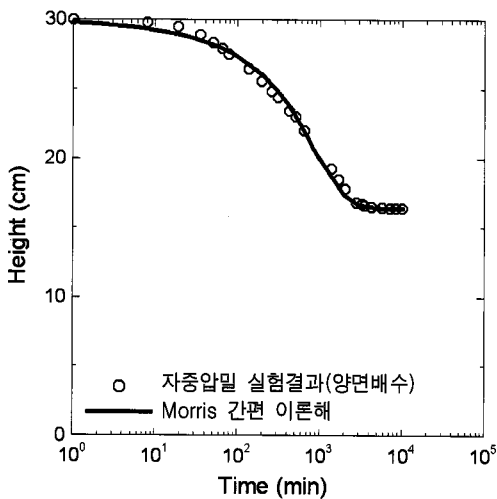


그림 9. 자중압밀 실험결과와 Morris 간편 이론해 비교(카올리나이트, 시료높이 30cm, 양면배수)

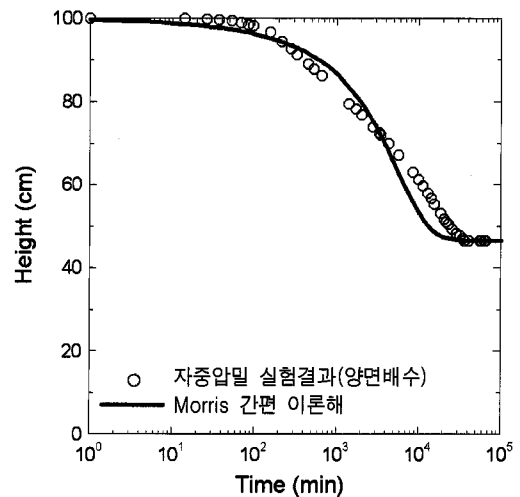


그림 10. 자중압밀 실험결과와 Morris 간편 이론해 비교(카올리나이트, 시료높이 100cm, 양면배수)

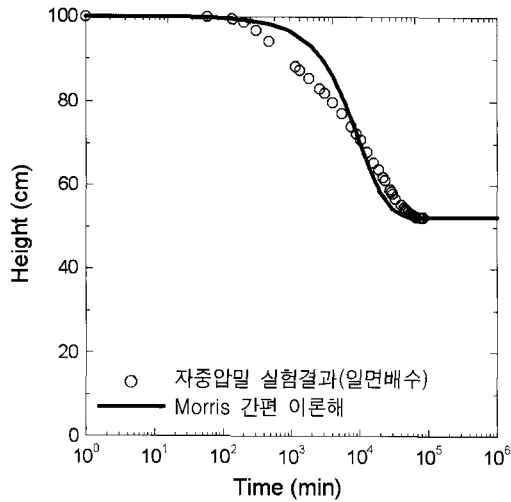


그림 11. 자중압밀 실험결과와 Morris 간편 이론해 비교(카올리나이트, 시료높이 100cm, 일면배수)

트 시료 100cm 높이의 경우에는 실험결과와 Morris(2002)의 간편 압밀이론해가 압밀도 50% 이전과 이후에서 약간 차이를 보였다. 이 오차는 Morris(2002)의 간편 압밀이론해에서 평균 압밀도(압밀도 50%) 시점에 산정한 유한변형 압밀계수를 모든 압밀구간에 적용하였기 때문이다. 하지만, 전반적으로 Morris(2002)의 간편 압밀해가 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동을 비교적 양호하게 예측한다고 판단된다.

### 3.3. PSSDF 해석결과와 자중압밀 실험결과 비교

비선형 유한변형 압밀해석 프로그램인 PSSDF의 적

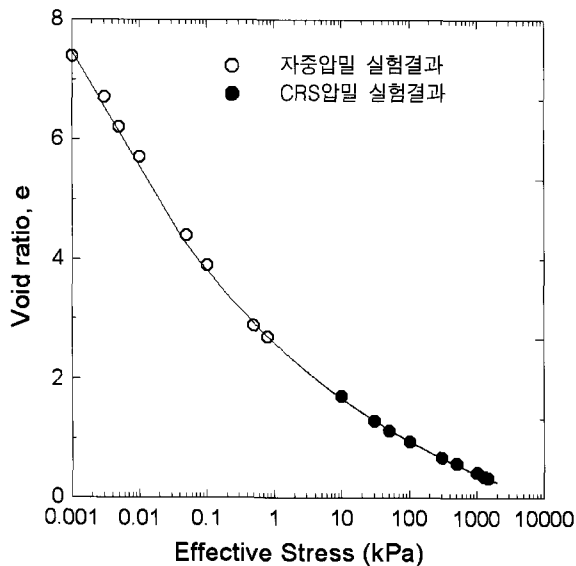


그림 12. 카올리나이트 시료의 간극비-유효응력 관계식(PSSDF 입력 물성치)

용성을 평가하기 위하여 카올리나이트 100cm시료에 대한 양면배수 자중압밀 실험결과(그림 5)를 동일 조건에서의 PSSDF 해석결과와 비교하였다. PSSDF 해석을 이용하여 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동을 평가하기 위해서는 초기간극비, 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계가 입력 물성치로 필요하다. 카올리나이트 시료에 대한 상기 비선형 유한변형 압밀 물성치는 동반 논문(곽태훈 등, 2011)에서 구한 초기간극비( $e_{00}=7.38$ )과 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계를 적용하였다.

PSSDF의 입력 데이터는 자중압밀 실험결과로부터 얻어진 값들로부터 내삽하여 간극비-유효응력 관계는 그림 12, 그리고 간극비-투수계수 관계는 그림 13과 같이 비선형 관계식을 적용하였다. 이러한 카올리나이트 시료의 비선형성을 PSSDF에 적용하여 해석하고 그 결과를 실내 자중압밀 실험결과와 비교하여 그림 14에 나타냈다. 그림 14는 카올리나이트 100cm 높이 시료에 대한 양면배수 조건으로 자중압밀을 수행한 결과와 PSSDF 해석결과를 비교한 그래프이다.

그림 14 결과(카올리나이트 100cm 시료에 양면배수 조건)를 동일한 조건에 대해 얻어진 Morris(2002)의 간편 이론해(그림 10)와 비교해 보면, PSSDF 해석 결과와 Morris(2002)의 간편 이론해 보다 실내 자중압밀 실험결과와 상대적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 Morris(2002)의 간편 압밀 이론해에서는 평균 압밀도(압밀도 50%) 시점에 산정한 유한변형 압밀계수를 모든 압밀구간에 적용하여 단순화 시킨 것에 비하여, PSSDF는 각 압밀

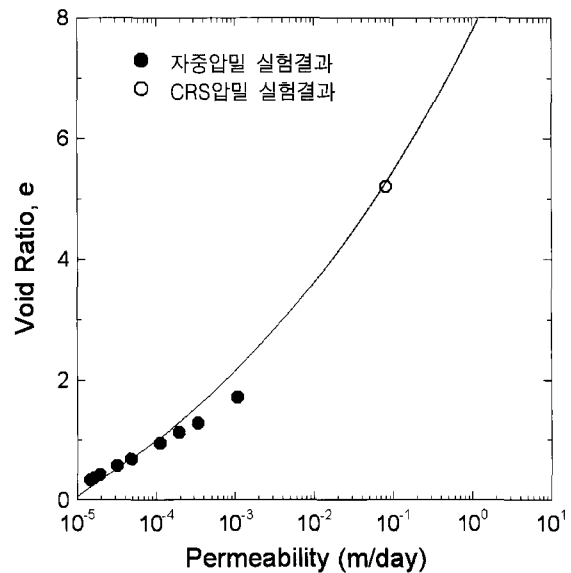


그림 13. 카올리나이트 시료의 간극비-투수계수 관계(PSSDF 입력 물성치)

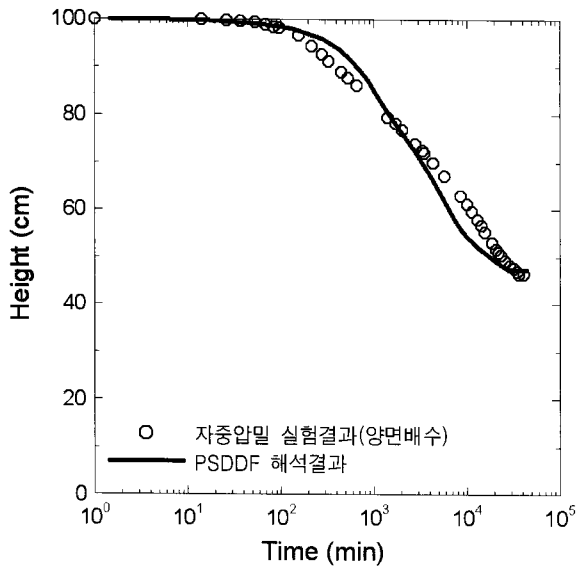


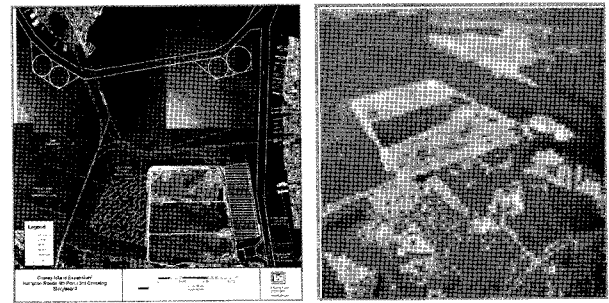
그림 14. 자중압밀 시험 결과와 PSDDF 해석결과 비교(카올리나이트 100cm 시료, 양면배수 조건)

단계에서 비선형 유한변형 구성관계식을 유한차분한 해석결과를 반영함으로써 준설 매립지반의 비선형 유한 변형 압밀거동을 보다 정확히 예측할 수 있기 때문이다. 실내 시험을 통해 산정한 비선형 압밀 물성치를 PSDDF 해석에 적용하여 실제 대심도 준설 매립지반의 압밀거동을 비교적 정확히 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. Craney Island 준설매립장의 사례분석

현재 미국에서는 사용 가능한 준설토 투기장소 및 매립 장소가 해마다 줄어들고 환경오염에 대한 우려로 기존 준설토 매립장의 준설토 저장 및 보유능력 극대화에 많은 관심이 모아지고 있다. 본 연구에서는 인공적으로 조성된 Craney Island의 사례분석을 통하여 적절한 비선형 유한변형 압밀 파라미터 선정의 중요성과 PSDDF를 이용한 준설 매립지반의 압밀거동 평가의 적용성을 파악하고자 하였다.

미국 버지니아주 노포크 근처에 위치한 인공적으로 조성된 Craney Island 준설매립장(Craney Island Dredged Material Management Area, CIDMMA)은 1956년부터 인근 수로와 항구로부터 준설된 토사가 매립 저장되고 있다. 준설매립장의 연면적은 8.9km<sup>2</sup>로 해마다 약 3.1×10<sup>6</sup> ~ 5.4×10<sup>6</sup>m<sup>2</sup>의 준설토가 매립되어 10-12m 두께의 준설 매립층이 30-37m 두께의 연약한 해성점토 원지반위에 형성되어 있다. 매립초기에는 이 CIDMMA가 2000년경에 매립 한계고(평균해수면에서부터 9.2m)에 이를 것으로 예측되었으나, 전술한바와 같이 기존 매립시설의 수



(a) 계획도

(b) 항공사진

그림 15. CIDMMA 계획도와 항공사진

표 2. 수치해석에 사용된 물성치(CIDMMA)

물성치	적극적인(active) 표면 배수조건에 대한 물성치
표층 배수효율(%)	100
최대 증발효율(%)	100
건조시 포화도(%)	80
최대 건조층(crust) 두께(m)	0.31
투기 후 건조시작 시간(days)	30
지하수위(m, 평균해수면에서)	0.46
포화상태에서 초기간극비	6.5
완전 건조상태에서 간극비	3.2
초기슬러리 간극비	10.5
$C_i/C_c$	0.2
$C_w/C_c$	0.04
해성점토 원지반 초기간극비	0.65
해성점토 원지반 투수계수(m/s)	1E-09

명연장이 요구되어 미공병단은 CIDMMA에 오직 제한적으로 준설토를 선별하여 매립하는 프로그램(RUP)을 시행하였다. 특히, 1984년부터는 두개의 중간제방을 건설하여 8.9km<sup>2</sup> 면적의 CIDMMA를 3개의 구획으로 나누어 준설토를 순환 매립하여 운영하고 있다. 순환 매립 방식에서는 초기에는 준설토가 CIDMMA 중앙구획에만 매립되고, 매립고가 0.3m에 도달하면 남쪽구획에 매립한다. 다시 남쪽구획의 매립고가 0.3m에 도달하면 이번에는 북쪽구획으로 옮겨감으로서 각 구획에 자중압밀과 배수 그리고 증발산에 의한 토체의 추가 체적감소가 충분히 발생할 수 있는 시간을 확보하도록 준설 매립을 운영하였다. 그림 15의 CIDMMA 계획도와 항공사진에서 이 세부부분의 구획을 볼 수 있다.

PSDDF 해석에 필요한 준설토의 초기간극비는 6.5이고, 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계는 Stark 등 (2005b)과 동반논문(곽태훈 등, 2011)의 그림 5와 8에 제시한 'Craney Island' 자료를 적용하였다. 기타 입력 물성치는 표 2에 정리하였다. 표 2에 제시된 물



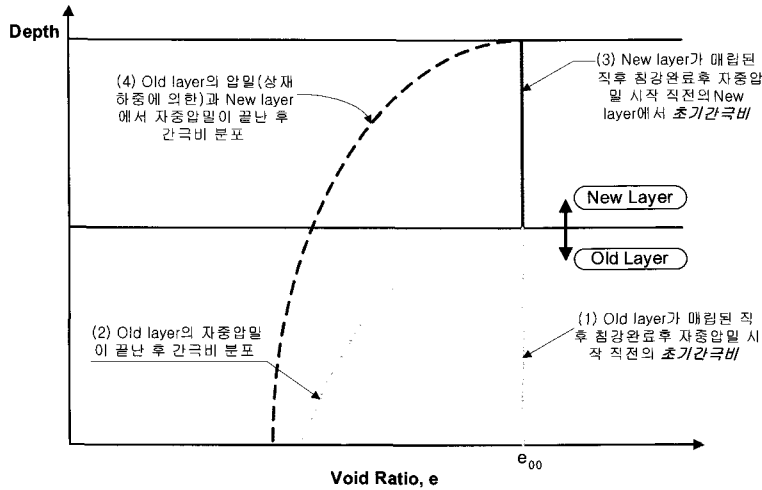


그림 16. PSDDF에서 단계매립을 적용하는 방식

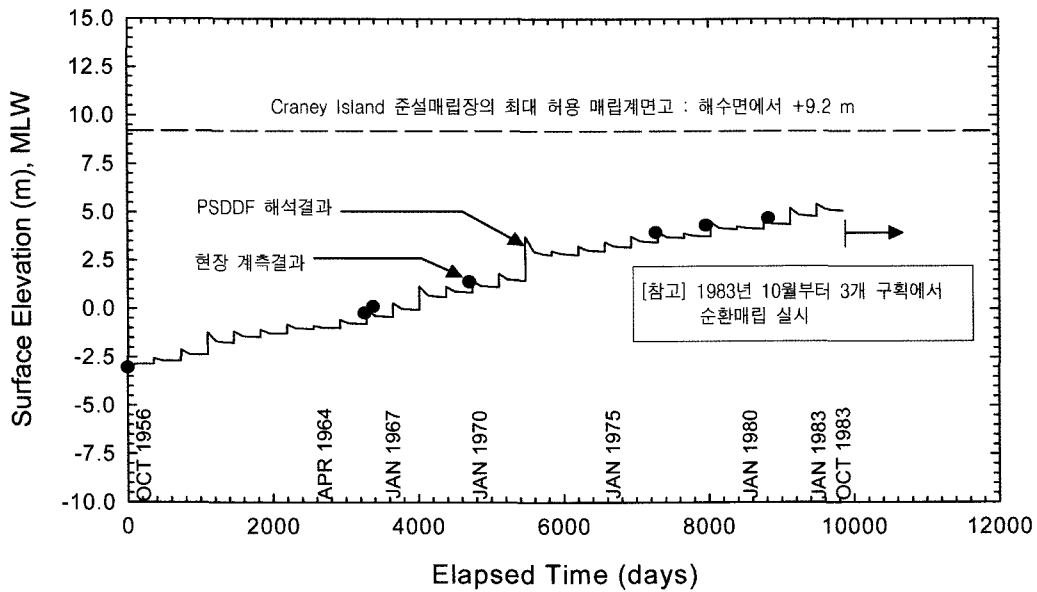


그림 17. CIDMMA 계면고에 대한 PSDDF 해석결과와 계측치 비교 (1956년~1983년)

성치는 적극적인(active) 표면 배수조건에 대해 산정한 것으로 일련의 실내실험을 통해 얻은 값이다(Stark 등, 2005b). 준설 매립지반의 이차압밀을 고려하기 위한  $C_v/C_c$ 와  $C_a/C_c$ 는 각각 0.2와 0.04로 산정되었다. 준설토 표면건조에 영향을 미치는 인자(예를 들어, 표층 배수효율)는 적극적인 표면 배수조건을 반영하기 위해 100%로 두고, 나머지 최대 증발효율, 건조시 포화도, 최대 건조층(crust) 두께 등은 미공병단의 추천치를 적용하였다.

전술했듯이 Craney Island 준설 매립장은 순환 매립방식을 운영하므로 PSDDF 해석에서 단계매립 거동을 적절히 반영해야 한다. PSDDF 프로그램에서 단계매립을 고려하는 방식은 증발산에 의한 건조수축이 발생하지 않는 경우에 대해 그림 16과 같다.

준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동 모사를 위한 PSDDF의 적용성을 평가하기 위해 CIDMMA의 장기 침하거동을 PSDDF로 예측하고 이를 현장 계측값과 비교하였다. 이 사례분석에서는 준설 매립지반의 일차 및 이차압밀을 고려하고 1992년부터 2002년까지의 실제 매립일정을 적용하여 PSDDF 해석을 수행하였다. 1956년 10월부터 1983년 10월까지 준설매립 일정과 압밀침하에 의한 계면고 변화에 대한 수치해석 결과와 현장 계측치 비교를 그림 17에 나타냈다. 이 시점까지 PSDDF 해석결과는 계면고 계측치와 잘 일치함을 볼 수 있다.

그림 17의 1983년까지 해석결과를 PSDDF의 'RESTART' 옵션을 통해 추가해석의 입력값으로 적용하고 미공병단에서 제안한 순환 매립방식을 고려하여 1983년 이

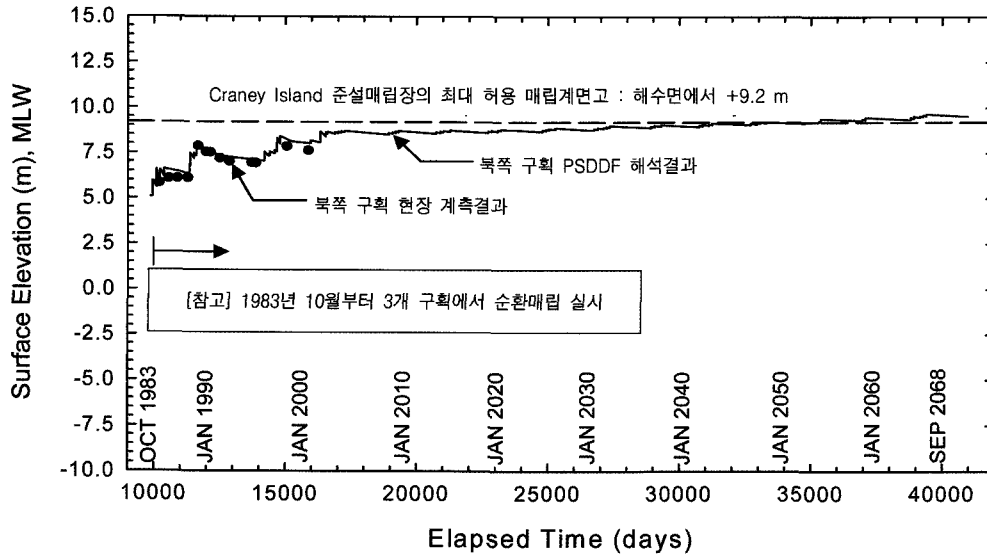


그림 18. CIDMMA 북쪽 구획 계면고에 대한 PSDDF 해석결과와 계측치 비교(1983년~2070년)

후의 해석이 수행되었다. 순환 매립방식에 따라 1983년 10월부터 2070년까지 CIDMMA 북쪽구획에 대한 준설 매립 일정과 압밀침하에 의한 계면고 변화에 대한 수치 해석 결과와 현장 계측치 비교를 그림 18에 나타냈다. 마지막 계면고 현장계측은 2000년 4월에 수행되었고, 그림 18에서 보듯이 PSDDF 해석결과가 계면고 계측값과 잘 일치함을 알 수 있다. CIDMMA에서 계획된 허용 매립 계면고는 평균해수면에서부터 9.2m이고 본 사례 분석에서 보듯이 2057년 9월에는 이 북쪽구획이 허용 매립 계면고에 이른다. 이 결과는 Stark 등 (1994)이 예측한 결과보다 10년 정도 빠른데 이는 1992년부터 2002년까지의 실제로 매립된 준설토양이 그들이 예측했던 것보다 많았기 때문이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동을 평가하기 위해 단순화된 Morris의 간편 이론해와 PSDDF 해석방법이 제시되었다. 이를 위해 동반논문에서 얻어진 초기간극비, 비선형의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계를 적용하여, 실제 준설 매립지반의 장기간 비선형 유한변형 압밀거동을 모사하는데 두 방법의 적용 가능성을 보였다. 또한, Crane Island 준설매립장 사례분석을 통하여 PSDDF의 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- (1) 인천 준설토와 카울리나이트 시료에 대한 일면 및 양면배수 조건으로 수행한 30cm, 100cm 높이의 자중압밀 실험결과, 일반적으로 예측할 수 있듯이 시간에 따른 자중압밀 속도 비교는 배수거리 차이로 인해 상하부 양면배수 조건이 상부 일면배수 조건보다 매우 빠름을 확인하였다. 또한, 양면배수 경우에는 하방으로 침투수력이 작용하여 상부 일면배수 경우보다 다소 큰 유효응력이 발현되어 상대적으로 큰 최종침하량이 측정되었다.
- (2) 인천 준설토와 카울리나이트 30cm 시료에 대한 Morris(2002)의 간편 압밀이론해가 실내 자중압밀 실험결과와 잘 일치하였으나 카울리나이트 100cm 시료의 경우에는 실험결과와 Morris의 간편 해가 압밀도 50% 전후에서 약간 차이를 발생하였는데, 이는 Morris(2002)의 간편 이론해는 압밀도 50% 시점에 산정한 유한변형 압밀계수를 모든 압밀구간에 적용하였기 때문이다. 이러한 가정 때문에 Morris의 간편 이론해를 실제 대심도 준설매립지반이나 단계매립에 따른 지반거동 해석에 적용하는데 제한적이다.
- (3) 양면배수 조건으로 카울리나이트 100cm 시료에 대한 PSDDF 해석결과는 동일한 조건에서 얻어진 Morris(2002)의 간편 이론해 보다 모든 압밀도에서 실내 자중압밀 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 이는 PSDDF 해석에서는 각 압밀 단계에서 비선형 유한변형 구성관계식을 유한차분한

해석결과를 반영함으로써 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동을 보다 정확히 예측할 수 있기 때문이다.

- (4) 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동 모사를 위한 PSDDF의 적용성을 평가하기 위해 Craney Island 준설매립장 사례분석에서, 실제 현장에 적용된 준설토 매립일정과 일차 및 이차압밀침하를 고려한 PSDDF해석은 현장에서 계측한 시간에 따른 계면고 변화를 비교적 정확하게 예측하였다. 따라서, 비선형 유한변형 압밀해석 프로그램인 PSDDF를 다양한 준설토 매립조건에 대해 적용한다면, 설계 단계에서 준설매립장의 장기 침하거동을 보다 정밀하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(09기술혁신E06)에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. 박대훈, 이철호, 임지희, 안용훈, 최항석 (2011), “초연약 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀해석기법, Part I: 해석 물성치 평가” 한국지반공학회논문집, (동반논문), 제27권 제9호, pp.13-24.
2. 최항석, Stark, T. D. (2005), “Craney Island 준설매립장의 장기 침하거동 예측을 위한 PSDDF 해석”, 2005 대한토목학회 정기학술대회, pp.3527-3530.
3. Cargill, K. W. (1982), *Consolidation of Soft Layers by Finite Strain Analysis*, Miscellaneous Paper GL-82-3, US Army Engineer

Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

4. Cargill, K. W. (1983), “Prediction of consolidation of very soft soil”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.6, pp.775-795.
5. Cargill, K. W. (1986), *The large strain, controlled rate of strain (LSCRS) device for consolidation testing of soft fine-grained soils*, Technical Report GL-86-13, US Army Engineer Waterways Experiment Station, MS.
6. Gibson, R. E., England, G. L., Hussey, M. J. L. (1967), “The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers”, *Geotechnique*, Vol.17, No.3, pp.261-273.
7. Hindebrand, F. B. (1949), *Advanced calculus for engineers*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
8. Mesri, G., Godlewski, P. M. (1977), “Time- and Stress-Compressibility Interrelationships”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.103, No.5, pp.417-430.
9. Morris, P. H. (2002), “Analytical solutions of linear finite-strain one -dimensional consolidation”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, Vol.128, No.4, 319-326.
10. Stark, T. D., Choi, H., Schroeder, P. R. (2005a), “Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas, I: Theory and Use of Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol.131, No.2, pp.43-51.
11. Stark, T. D., Choi, H., Schroeder, P. R. (2005b), “Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas, II: Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill Input Parameters”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol.131, No.2, pp.52-61.
12. Stark, T. D., Contreras, I. A. and Fowler, J. (1994), “Management of Dredged Material Placement Operations”, *Proceedings of, Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, SETTLEMENT '94*, ASCE Specialty Conference, Texas A&M University, College Station, TX, Geotechnical Special Publication Vol.2, No.40, pp.1353-1365.

(접수일자 2011. 1. 15, 심사완료일 2011. 10. 27)